

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**UTILIZAÇÃO DOS ASPECTOS ERGONÔMICOS NA  
SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

**Carlos Sérgio Schneider**

Porto Alegre, 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Carlos Sérgio Schneider**

## **UTILIZAÇÃO DOS ASPECTOS ERGONÔMICOS NA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia - Profissionalizante

Orientadora:

Lia Buarque de Macedo Guimarães, PhD

Porto Alegre, 2004

Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia - Profissionalizante

---

Lia Buarque de Macedo Guimarães, PhD  
Orientadora Escola de Engenharia/UFRGS

---

Profa. Helena Beatriz Bettella Cybis, Dra.  
Coordenadora MP/Engenharia/UFRGS

BANCA EXAMINADORA:

Paulo Ivo Homem de Bittencourt Jr, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ricardo Augusto Cassel, PhD.  
UNISINOS

Tarcisio Abreu Saurim, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à Ana Cláudia, minha amada, e aos meus filhos Cynara, Carlos Guilherme e Daniel, por quem tudo vale à pena.

Agradeço a todos que de alguma maneira me ajudaram na conclusão deste trabalho, especialmente à Ana Trindade Winck, Ariel Andréa Monteiro, Jacinta Sidegum Renner, Leandro Krug Wives, Ricardo Ferreira de Oliveira, Rosangela Bez, e aos meus pais Edgar e Edy.

Agradeço de forma especial à minha orientadora, Lia Buarque de Macedo Guimarães, pelas idéias, orientações, e pela sua grande paciência.

## RESUMO

A simulação, como ferramenta de suporte à tomada de decisão, tem sido utilizada nas mais variadas áreas do conhecimento e especialmente no projeto e dimensionamento de plantas de produção. Em geral, os simuladores para sistemas de produção consideram variáveis relativas à quantidade, tipo e disposição física de máquinas, quantidades dos estoques intermediários, e aos tempos de produção sem, no entanto, considerar os tempos reais do trabalho do ser humano envolvido no processo, apesar de a mão de obra humana ser largamente empregada nestes sistemas, afetando diretamente a sua produtividade. Uma das possíveis razões disto é a complexidade dos fatores que influenciam na produtividade do ser humano, que varia em função de fatores ambientais, fisiológicos, psicológicos ou sociais. Normalmente, os sistemas de simulação da produção representam o trabalhador humano da mesma forma como representam uma máquina, uma ferramenta ou um equipamento, cuja previsibilidade é bem maior. Esta dissertação avalia a questão humana em um simulador bastante utilizado comercialmente, e evidenciou que os fatores ergonômicos são capazes de alterar significativamente os resultados de uma simulação, justificando o desenvolvimento de rotinas computacionais capazes de representar o elemento humano e suas interações com o sistema, de forma mais fidedigna.

**Palavras-chave:** simulação, fatores humanos, ergonomia, sistemas de produção.

## ABSTRACT

Simulation as a tool to support the decision making process has been used in many fields and especially in the design and dimensioning of production plants. Most production system simulators consider variables related to quantity, type and physical distribution of machines, quantity of the intermediate stocks, and to the production times, without, however, considering the actual working times of the human being involved in the process, despite of the workmanship hand being largely employed in these systems, directly affecting its productivity. One of its possible reasons is the complexity of the factors that have influence in the human productivity, which changes in function of environmental, psychological and social factors. Normally, production simulation systems represent the human worker the same way they represent a machine, a tool or equipment, which are much more previsible. This work evaluates the human factor in a simulation software that is largely used in commercial applications, and showed that the ergonomic factors are capable of significantly change the simulation results, justifying the development of computational routines able to represent the human element and its interactions with the system in a more realistic manner.

**Key words:** simulation, human factors, ergonomics, production systems.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	8
1. INTRODUÇÃO .....	10
1.1 OBJETIVOS .....	16
1.2 ESTRUTURAÇÃO DESTE TRABALHO .....	16
2. SIMULAÇÃO .....	18
2.1 BREVE HISTÓRICO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	20
2.1.1 O Período da Busca .....	21
2.1.2 O Advento .....	21
2.1.3 O Período da Formação .....	22
2.1.4 O Período da Expansão .....	23
2.1.5 O Período da Consolidação e da Regeneração .....	24
2.1.6 O Período dos Sistemas Integrados .....	25
2.2 O FUTURO DA SIMULAÇÃO .....	25
2.2.1 Aplicações sobre a Internet .....	25
2.2.2 Integrações com Sistemas de ERP .....	25
2.2.3 Otimização das Rotinas .....	26
2.2.4 Programação Orientada a Objetos .....	26
2.3 SISTEMAS E MODELOS .....	26
2.3.1 Sistemas Contínuos .....	27
2.3.2 Sistemas Discretos .....	28
2.4 ELEMENTOS DA SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS .....	29
3. PLANEJAMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE SIMULAÇÃO .....	32
3.1 ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE SIMULAÇÃO .....	34
3.1.1 Formulação do Problema .....	34
3.1.2 Coleta de Dados e Análise do Sistema .....	34
3.1.3 Construção do Modelo .....	35
3.1.4 Estimativa dos Parâmetros e das Características Operacionais .....	36
3.1.5 Avaliação do Modelo .....	36
3.1.6 Formulação do Programa de Computador .....	37
3.1.7 Validação .....	38
3.1.8 Projeto de Experiências de Simulação .....	39
3.1.9 Análise de Dados Provenientes da Simulação .....	39

4. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA .....	41
4.1 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE SIMULAÇÃO DE MANUFATURA.....	43
4.2 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SISTEMAS DE MANUFATURA .....	44
4.3 QUESTÕES ESTATÍSTICAS NA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA ....	45
5. SIMULAÇÃO DO TRABALHO HUMANO.....	47
5.1 ESTUDOS COM SISTEMAS MILITARES.....	49
5.2 CONTROLE DE VÔO E TRÁFEGO AÉREO .....	50
5.3 CONTROLE DE PRODUÇÃO .....	50
5.4 O PROJETO EMSING – SIMULANDO A FADIGA RELACIONADA AO TRABALHO .	51
5.4.1 Descrição dos fatores de esforço .....	53
5.4.2 Base de dados de fatores ergonômicos .....	54
5.4.3 Interpretação dos dados ergonômicos .....	54
5.5 SIMULANDO A QUALIFICAÇÃO DOS TRABALHADORES.....	55
5.6 SIMULANDO GRUPOS DE TRABALHADORES.....	60
5.7 SIMULANDO FATORES DE BAIXO NÍVEL.....	65
5.7.1 Alterações de performance relacionadas à idade .....	66
5.7.2 Alterações de performance relacionadas aos ciclos circadianos.....	67
6. INCORPORANDO CICLOS CIRCADIANOS EM MODELOS DE SIMULAÇÃO .....	71
6.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SIMULADO .....	73
6.2 INCORPORANDO VARIAÇÕES DE PERFORMANCE DEVIDO AOS CICLOS CIRCADIANOS .....	77
7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....	83
REFERÊNCIAS .....	85
APÊNDICE.....	89



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Formas pelas quais um sistema pode ser estudado.....	12
Figura 2: Exemplo de Sistemas Contínuos: Comportamento do nível de água em uma represa .....	29
Figura 3: Exemplo de Sistemas Discretos: Quantidade de pacientes esperando atendimento em um ambulatório médico .....	30
Figura 4: Fluxograma para o planejamento de experiências de simulação.....	34
Figura 5: Estrutura básica do módulo de extensão EMSIG .....	53
Figura 6: Escala da categoria de risco à que está exposto um determinado trabalhador, utilizado no módulo de extensão EMSIG .....	56
Figura 7: Elementos da rede de processos para a construção do modelo.....	58
Figura 8: Interação dos trabalhadores dentro do processo de manufatura .....	59
Figura 9: Imagem do modelo em execução .....	60
Figura 10: Características de Projeto de Estruturas de Trabalho .....	62
Figura 11: Atributos e Variáveis do Componente “Trabalhador” .....	64
Figura 12: Estrutura do Modelo de Alocação de Tempo.....	65
Figura 13: Diminuição da Performance em Função da Idade.....	68
Figura 14: Modelo de ciclo circadiano conforme Spencer: trabalho inicia três horas após despertar .....	70
Figura 15: Teste DSST – <i>Digital Symbol Substitution Task</i> .....	71
Figura 16: Alterações da produtividade ao longo de um dia .....	72
Figura 17: Variações da performance ao longo de uma semana .....	73
Figura 18: Modelo de simulação Mfg_cost.mod fornecido pelo software ProModel.....	74

Figura 19: Amostra do model Mfg_cost.mod em operação no tempo t = 5h31min. ....	77
Figura 20a: 70% de peças boas .....	79
Figura 20b: 80%de peças boas .....	79
Figura 20c: 90% de peças boas .....	80
Figura 20d: 100% de peças boas .....	80
Figura 21a: 70% de peças boas .....	80
Figura 21b: 80% de peças boas .....	80
Figura 21c: 90% de peças boas .....	81
Figura 21d: 100% de peças boas .....	81

# 1. INTRODUÇÃO

Simulação é a imitação de processos reais (KELTON *et al.*, 2002). A simulação consiste na construção de modelos abstratos, através dos quais pode-se observar o comportamento de um determinado sistema durante um período de tempo. Assim, podem-se fazer testes, visando encontrar a melhor solução para problemas reais. Um dado do sistema pode então ser estudado a fim de medir sua capacidade, melhorar seu desempenho ou até ser projetado, se ele ainda não existe. Também pode-se utilizar a simulação para testes em situações de risco, como no treinamento de pilotos em tempestades ou sob fogo inimigo, ou em situações hipotéticas como nas viagens espaciais ou ambientes de guerra.

Os primeiros relatos do uso sistemático da simulação como uma ferramenta vem do Império Romano para treinamento militar (PATIENT, 2003). Utilizava-se um tronco de árvore sobre o qual eram desferidos golpes de espada. Uma vez adquiridas as habilidades necessárias, o processo continuava com a prática sobre um barco e finalmente com a utilização de um modelo de soldado inimigo de dois metros de altura, feito de madeira e dotado de escudo e espada, que o soldado enfrentava armado de espada e escudo e montado sobre um cavalo.

Um modelo normalmente é construído a partir de uma série de suposições concernentes à operação do sistema (BANKS, 2001), e é definido como sendo uma coleção de entidades, isto é, pessoas, máquinas ou equipamentos, que agem e interagem conjuntamente para a realização de um determinado objetivo (LAW E KELTON, 1991). Estas suposições devem ser expressas através de equações matemáticas, lógicas ou

simbólicas, e devem refletir as relações existentes entre os objetos de interesse do sistema. Uma vez desenvolvidas, estas suposições deverão ser validadas para que se tenha a certeza de que refletem com exatidão a situação real que se quer simular. A partir daí, pode-se utilizá-lo para responder a uma grande gama de questões do tipo "e se", permitindo que alterações no sistema possam ter seu impacto previsto antes da implementação real, ou para prever a performance do sistema sob várias situações e circunstâncias.

Muitas vezes, modelos podem ser desenvolvidos simplesmente com base na aplicação de métodos matemáticos, como cálculo diferencial, teoria da probabilidade, métodos algébricos ou outras técnicas matemáticas (BANKS, 2001, LAW E KELTON, 1991). Entretanto, muitos problemas do mundo real são tão complexos que se torna virtualmente impossível resolvê-los matematicamente. Nestes casos, métodos numéricos, associados ao poder de efetuar um grande número de cálculos dos computadores, podem ser utilizados para imitar o comportamento de um sistema. A figura 1 mostra diversas formas pelas quais um sistema pode ser estudado (LAW E KELTON, 1991).

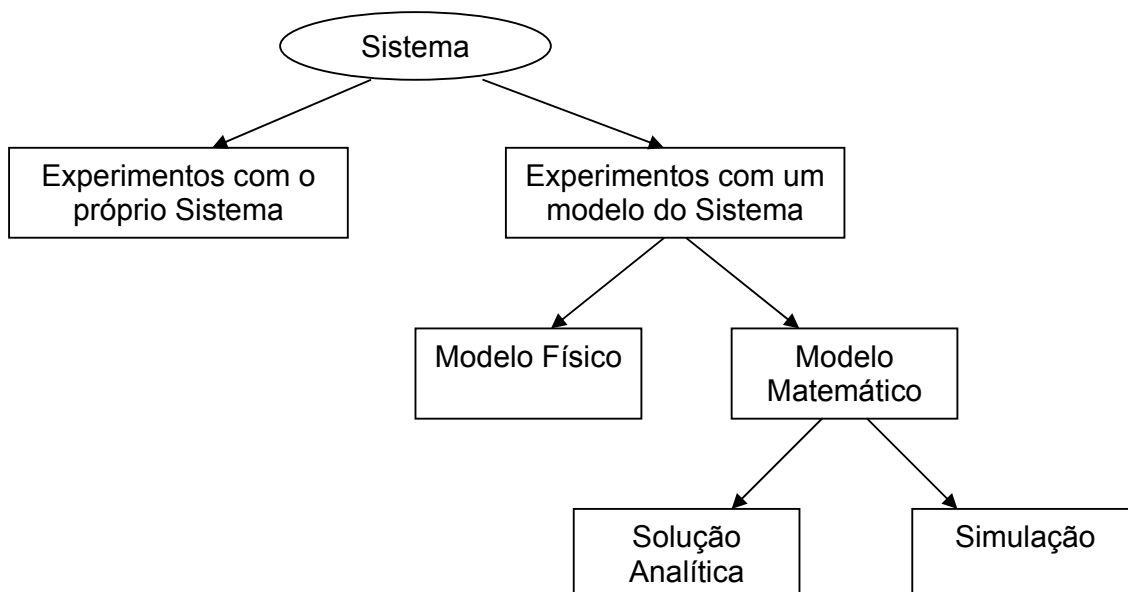


Figura 1: Formas pelas quais um sistema pode ser estudado (Fonte: LAW E KELTON, 1991, p.4)

O crescimento do poder de computação durante os últimos anos tem sido um grande alavancador deste tipo de solução, e vários pacotes de software de simulação têm sido desenvolvidos. Alguns deles, mais genéricos, propõem-se a resolver uma gama bastante grande de problemas. Outros, mais focados, pretendem ser utilizados em um tipo específico de problema (BANKS, 2001).

Algumas das áreas que têm se beneficiado da simulação como suporte à tomada de decisão, são:

- Simulação de processos de manufatura;
- Fabricação de semicondutores;
- Construção civil;
- Aplicações militares;
- Logística, transporte e distribuição;
- Simulação de processos de negócios;
- Avaliação do *lay-out* funcional em prestação de serviços;
- Análise de sistemas econômicos e financeiros;
- Ergonomia.

Algumas questões específicas que podem ser respondidas utilizando simulação estão listadas a seguir (LAW E McCOMAS, 1998):

- Necessidade de Pessoal e Equipamento
  - Quantidade, tipo e disposição física de máquinas para atender a um objetivo específico;
  - Necessidade de transportadores, esteiras, *pallets*, e outros equipamentos de apoio;
  - Localização e tamanho dos estoques intermediários;
  - Avaliação de alterações no *mix* de produção;
  - Avaliação do efeito de um novo equipamento em um sistema de manufatura já em funcionamento;
  - Avaliação de investimentos de capital;

- Planejamento das necessidades de mão-de-obra;
- Quantidade de turnos de trabalho.
  
- Avaliação de Performance
  - Análise da capacidade de processamento (*throughput*);
  - Análise dos tempos de processamento;
  - Análise de gargalos.
  
- Análise de Processos Operacionais
  - Análise da programação da produção;
  - Análise das políticas de estoque;
  - Análise das estratégias de controle;
  - Análise da confiabilidade (efeitos da manutenção preventiva);
  - Análise das políticas de controle de qualidade.

A seguir estão listadas algumas das medidas de desempenho normalmente analisadas por meio da simulação:

- Capacidade de processamento do sistema (*throughput*);
- Tempos de processamento das partes do produto em cada etapa do sistema;
- Tempo em que as diversas partes do produto permanecem em espera;
- Tamanho das filas;
- Percentual de utilização de equipamento e pessoal.

A simulação é particularmente importante para a ergonomia, por permitir a previsão do comportamento de algum sistema sem expor o ser humano a um risco, e que de outra forma não poderia ser adquirida (MEISTER, 1995). Kirwan e Ainsworth<sup>1</sup> (1992, apud MEISTER, 1995, p.203) ressaltam que técnicas de simulação têm sido utilizadas neste sentido, em uma grande variedade de contextos, como, por exemplo, comparando

---

<sup>1</sup> Kirwan, B. and Ainsworth, L.K. (Eds.) (1992). *A Guide to Task Analysis*. (London: Taylor and Francis).

diferentes formas para executar uma tarefa ou testando a confiabilidade do ser humano em diagnosticar e solucionar problemas em usinas nucleares.

Muitas vezes, fazem-se alterações em um sistema para aumentar a produtividade do ser humano na realização de alguma atividade, quer seja pelo desenvolvimento de novas ferramentas, quer seja pelo de um aumento da automação do sistema. Algumas alterações poderão ser projetadas para diminuir a carga de trabalho do ser humano (KELLER, 2002). Entretanto, em alguns casos, as tarefas necessárias para operar o novo sistema podem, na realidade, aumentar a carga de trabalho (WICKENS, 1997). O aumento da carga de trabalho pode resultar na redução da produtividade e de performance do sistema. Neste sentido, modelos capazes de prever a carga de trabalho do ser humano podem ser extremamente úteis quando utilizados durante o projeto das alterações no sistema.

Keller (2002) apresenta técnicas para modelamento da carga de trabalho do ser humano. Wickens (1984) desenvolveu uma teoria de que a carga de trabalho não é resultado de um único processo central, mas é a resultante de vários processos simultâneos. Estes processos são divididos em quatro componentes: visual, auditivo, cognitivo e psicomotor, que podem ser coletivamente referidos por VACP. O ser humano, para exercer uma atividade qualquer, necessita dispensar recursos nestas quatro áreas. Os componentes visual e auditivo referem-se a estímulos externos recebidos. O componente cognitivo refere-se ao nível de informação necessário para executar uma atividade, enquanto que o componente psicomotora refere-se a atividades físicas. Por exemplo, os recursos necessários para exercer a tarefa de discar um número telefônico incluem a atividade cognitiva de buscar um número na memória, a atividade visual de olhar o teclado, a atividade psicomotora de utilizar os dedos para teclar os números e a capacidade auditiva para escutar os tons de alerta.

McCracken e Aldrich<sup>2</sup> (1984 apud KELLER, 2002) e Szabo e Birbaum<sup>3</sup> (1986 apud KELLER, 2002), desenvolveram escalas de avaliação para cada um dos componentes VACP. Trata-se de uma escala de avaliação relativa do nível que cada recurso utiliza. Para que o ser humano seja capaz de exercer uma atividade em cada um dos níveis descritos é necessário um nível de esforço correspondente. Quanto maior o índice de cada nível, maior é o esforço necessário para o ser humano.

Card, Moran e Newel (1986) propõem um modelo simplificado do processador humano composto por um conjunto de parâmetros de memória, processadores e de um conjunto de princípios de operação. O modelo do processador humano tem três subsistemas que interagem: i) o sistema perceptual; ii) o sistema motor e iii) o sistema cognitivo; cada um com suas próprias memórias e processadores. O sistema perceptual consiste de sensores (sendo os mais importantes o visual e o auditivo) e bancos de memória, que levam informações do mundo exterior para ser simbolicamente codificados. O sistema cognitivo fará uso das informações simbolicamente codificadas pelo sistema perceptual, além de outras, oriundas da memória de longo prazo, para tomar decisões. O sistema motor fica, então, encarregado de executar as ações necessárias, pela ativação voluntária dos músculos. Para os operadores empregados em manufatura, os sistemas motores mais importantes são os braços, mãos e dedos, e cabeça e olhos.

Apesar da existência destes estudos que demonstram como os fatores humanos influenciam na produtividade do ser humano, muito pouco deste conhecimento já foi incorporado aos softwares de simulação. Normalmente, o ser humano é modelado, nestes sistemas, como um recurso ao qual se atribui uma produtividade média, da mesma forma como se modela uma máquina, cujo comportamento, ao longo do tempo, é bem mais previsível.

---

<sup>2</sup> McCracken, J.H. and T.B. Aldrich. 1984. Analysis of selected LHX mission functions: Implications for operator workload and system automation goals (Technical Note ASI479-024-84). Fort Rucker, AL: Army Research Institute Aviation Research and Development Activity.

<sup>3</sup> Szabo, S. M. and C. R. Bierbaum. 1986. A comprehensive task analysis of the AH-64 mission with crew workload estimates and preliminary decision rules for developing and AH-64 workload prediction model (Technical Report ASI678-204-86[B], Vol I, II, III, IV). Fort Rucker, AL: Anacapa Sciences, Inc.



## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é verificar se a incorporação de fatores humanos, relacionados às variações de performance, pode alterar os resultados de uma simulação de um sistema de manufatura.

O impacto de alguns fatores humanos que pode alterar o desempenho do sistema humano-máquina foi avaliado com base no desenvolvimento de técnica de simulação, a partir de um modelo fornecido por um dos principais softwares de simulação existente no mercado.

A partir do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar na literatura trabalhos que tenham sido realizados onde foram inseridos fatores humanos em experiências de simulação, verificando, se possível, as técnicas computacionais e algoritmos utilizados.
- Utilizar estes dados em um modelo de simulação já existente, onde não tenham sido consideradas as alterações relacionadas aos fatores humanos.

## 1.2 ESTRUTURAÇÃO DESTE TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 se faz um levantamento histórico da utilização da simulação por computador. Além disto se faz a definição de sistemas e modelos, a caracterização dos tipos de simulação e a descrição dos elementos da simulação por eventos discretos.

No capítulo 3 é descrito como são realizados o planejamento e o desenvolvimento de experiências de simulação. As etapas necessárias para desenvolvimento de experimentos de simulação são descritas e explicadas.

No capítulo 4, verifica-se quais são os aspectos relacionados à simulação de sistemas de manufatura. Neste capítulo se verá quais são as questões relacionadas a este tipo de sistemas, e que podem ser respondidas através do uso da simulação e como se faz a validação destes modelos.

No capítulo 5 são verificados como o trabalho humano interage com os diversos tipos de sistema. Descrevem-se estudos relacionados a trabalho humano nas áreas militar, de controle de tráfego aéreo e de sistemas de produção. São descritos ainda alguns experimentos onde questões ergonômicas são introduzidas na simulação.

No capítulo 6 é descrito um estudo de simulação que foi desenvolvido para verificar a influência das variações de performance do ser humano, relacionados aos ciclos circadianos, sobre um sistema de produção

Finalmente, no capítulo 7 descreve-se as conclusões e recomendações oriundas deste trabalho.

## 2. SIMULAÇÃO

Há várias razões para se simular algo. Certamente um dos mais importantes é o incessante desejo do homem de conhecer o futuro, desejo este que é tão antigo quanto a própria história da Humanidade. Filósofos como Platão, Aristóteles, Euclides e outros, desenvolveram métodos puramente dedutivos na busca do poder de predição. Hans Reichenbach<sup>4</sup> (1951 apud NAYLOR, 1971), rotulou esta procura de conhecimentos preditivos como “filosofia especulativa”.

A filosofia especulativa procurou adquirir um conhecimento de generalidades e dos princípios mais gerais que governam o Universo. Construíram-se então sistemas filosóficos incluindo capítulos que hoje devemos encarar como uma singela tentativa de construir uma física compreensiva, uma física na qual a função da explanação científica era preenchida por simples analogias com experiências da vida diária. Tentou-se justificar o método de conhecimento por uma utilização similar de analogias; questões da teoria do conhecimento foram respondidas mais por uma linguagem figurada que por uma análise lógica. (REICHENBACH, 1951 apud NAYLOR, 1971, p. 13).

Vários filósofos reconheceram as limitações da “filosofia especulativa” como metodologia para a predição do futuro, em especial Sir Francis Bacon, que veio a tornar-se o pai da filosofia científica e publicou sua discordância em um livro denominado “Novum Organum”, conforme comenta Reichenbach (1951):

Bacon vê que a razão sozinha não tem nenhuma capacidade de previsão; ela o consegue somente em combinação com a observação. Os métodos de predição da razão estão contidos nas operações lógicas por meio das quais nós construímos uma ordem dentro da matéria observada e tiramos conclusões. Chegamos às previsões através das inferências lógicas. Bacon reconheceu, além disso, que se a inferência lógica é para servir aos fins da predição ela não pode ser

---

<sup>5</sup> Reichenbach, H. *The Rise of Scientific Philosophy*. Berkeley: University of California Press, 1951

restrita à lógica dedutiva; ela deve incluir métodos de lógica indutiva”.  
(REICHENBACH, 1951 apud NAYLOR, 1971, p. 13)

Portanto, a filosofia científica, ou método científico como é chamado, foi proposto como uma alternativa às limitações da “filosofia especulativa”. Em sua forma atual, o método científico consiste em quatro etapas bem conhecidas (NAYLOR, 1971):

- 1) Observação do sistema físico;
- 2) Formulação de uma hipótese ou, no caso da simulação por computador, de um modelo matemático que tente explicar as observações do sistema;
- 3) Predizer o comportamento do sistema baseado nessa hipótese, utilizando dedução matemática ou lógica, isto é, obtendo soluções para o modelo ou modelos matemáticos;
- 4) Execução de experiências para testar a validade da hipótese ou do modelo matemático.

No entanto, em algumas situações, é simplesmente impossível seguir estas quatro etapas, como no caso da exploração espacial ou em situações semelhantes, onde não é possível observar diretamente um modelo físico. Quando é esse o caso, alguma forma de simulação pode ser um substituto satisfatório para uma ou mais etapas. A impossibilidade de se seguir uma das etapas deve-se principalmente ao fato de que um experimento qualquer pode ser extremamente oneroso.

Por exemplo, antes do primeiro vôo orbital tripulado não se possuía nenhum dado sobre o efeito deste tipo de vôo sobre o ser humano, porque jamais algum ser humano o havia realizado. Uma alternativa seria fazer experiências com um grande número de vôos em grandes altitudes, utilizando pilotos de prova humanos. Este método foi rejeitado devido ao alto valor que se dá à vida humana. A NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), no entanto obteve bastante sucesso com a alternativa de simular extensivamente estes vôos em computadores (NAYLOR, 1971).

Outros processos também podem ser proibitivos, do ponto de vista do custo de obtenção, como por exemplo: dados sobre a frequência de paradas de uma nova linha de máquinas que está sendo lançada, e que tem poucas informações deste tipo arquivadas; ou o comportamento de grandes motores de foguetes; ou os efeitos de uma proposta de

diminuição de impostos na economia; ou os efeitos de uma campanha publicitária sobre o total de vendas; os efeitos de uma política particular de administração sobre os lucros, ou o efeito da mudança dos tempos ou inclusão de novos semáforos sobre o trânsito em uma grande metrópole. Em todos estes casos, a simulação pode ser utilizada como um meio efetivo de se gerar dados numéricos descritivos de processos que, de outra maneira, só poderiam fornecer tais informações a um preço muito elevado.

Além disto, um sistema pode ser tão complexo que se torne impossível descrevê-lo em termos de um conjunto de equações matemáticas e para o qual seja possível obter soluções analíticas que, enfim, seriam utilizadas para fins preditivos. Os sistemas econômicos, ou a linha de montagem de uma grande indústria, são apenas dois exemplos.

Hollocks<sup>5</sup>, (1992 apud CASSEL *et al.*, 2004), propõe uma definição formal para simulação computacional, como sendo uma técnica de Pesquisa Operacional, que envolve a criação de um programa computacional que representa alguma parte do mundo real de forma que experimentos no modelo são uma antevisão do que acontecerá na realidade, com o objetivo de apoiar decisões nos mais variados campos de conhecimento.

## 2.1 BREVE HISTÓRICO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O desenvolvimento do ambiente computacional sobre o qual a simulação pode ser realizada confunde-se com a própria história da computação. Os softwares utilizados para desenvolver os modelos de simulação podem ser divididos em três categorias (BANKS, 2001). Primeiramente, existem as linguagens, de propósito geral como FORTRAN, C e C++. Em segundo lugar, existem linguagens de programação específicas para simulação como GPSS/H<sup>TM</sup>, e SIMAN V<sup>®</sup>. Em terceiro lugar, existem os ambientes de simulação, que são pacotes de software desenvolvidos especificamente para a simulação de determinados sistemas. Estes pacotes de software distinguem-se pelo propósito a que se destinam, bem como por recursos de animação e apresentação gráfica de resultados.

---

<sup>5</sup> HOLLCKS, B. (1992). "A well-kept secret? Simulation in manufacturing industry reviewed." *OR Insight*, Vol. 5, No. 4, out. – dez. 1992, p. 12 – 17.

Alguns exemplos incluem o ProModel, Arena, AutoMod, Deneb/QUEST, Extend, Micro Saint, Taylor ED, WITNESS, entre outros.

Nance (1995) propôs classificar a história da simulação em computadores por meio de uma divisão dos anos de 1955 a 1986 em cinco períodos. Banks adicionou um sexto período que cobre os anos de 1987 até hoje. A divisão proposta é a seguinte:

- O Período da Busca
- O Advento
- O Período da Formação
- O Período da Expansão
- O Período da Consolidação e da Regeneração
- O Período dos Sistemas Integrados

### **2.1.1 O Período da Busca**

Nos primeiros anos, a simulação era efetuada utilizando FORTRAN ou outra linguagem de programação de propósito geral, sem o suporte de rotinas específicas de simulação. Neste período, grande parte do esforço de programação foi empregado na busca da unificação de conceitos e no desenvolvimento de rotinas que fossem reutilizáveis para facilitar a simulação. K.D. Thocher e D. G. Owen<sup>6</sup> (1960 apud BANKS, 2001) desenvolveram aquilo que foi considerado a primeira biblioteca de rotinas que poderiam ser reutilizadas em projetos de simulação subseqüentes.

### **2.1.2 O Advento**

Os precursores das Linguagens de Programação de Simulação utilizadas hoje em dia apareceram no período de 1961-65 (NANCE, 1995). Havia pacotes baseados em

---

<sup>6</sup> Thocher, K.D., e D.G. Owen [1960]. The Automatic Programming of Simulations, Proceedings of the Second International Conference on Operational Research. J. Banbury and J. Maitland. Eds. p. 50-68.

FORTRAM, como SIMSCRIPT e GASP (WILSON *et al.*, 1992), SIMULA, um descendente do ALGOL e GPSS.

A primeira Linguagem de Programação de Simulação foi o GPSS (General Purpose Simulation System) e foi desenvolvido por Geoffrey Gordon (BANKS, 2001) para ser executado em computadores IBM (NANCE, 1995). Baseava-se em um diagrama de blocos similar a um fluxograma. Em 1965, rodando sobre um IBM 2250 dotado de um terminal interativo, permitia a interrupção do processo para exibição de resultados intermediários, o que foi um fato marcante para a simulação. No entanto, os altos custos envolvidos impediram seu uso de forma mais abrangente (BANKS, 2001).

A linguagem SIMULA foi uma extensão ao ALGOL desenvolvido pelo Norwegian Computing Center em 1963 (NANCE, 1995). Era executada sobre o Univac 1107 e foi muito utilizada na Europa (BANKS, 2001).

Harry Markowitz criou o projeto conceitual do SIMSCRIPT, que começou seu desenvolvimento em 1963 (BANKS, 2001) por intermédio da RAND Corporation a pedido da Força Aérea Norte Americana. A linguagem, inicialmente fortemente influenciada pelo FORTRAN e que posteriormente assumiu uma personalidade própria, era baseada em um mecanismo de escalonamento de eventos.

Philip J. Kiviat, em 1961, iniciou o desenvolvimento do GASP (General Activity Simulation Program) (BANKS, 2001) por intermédio da Applied Research Laboratory of the United States Steel Corporation. Inicialmente foi baseada na linguagem de programação ALGOL, mas posteriormente foi alterada para o FORTRAN. Assim como o GPSS, utilizava-se da simbologia dos fluxogramas, familiar a engenheiros. Não era uma linguagem propriamente dita, mas uma coleção de rotinas FORTRAN para facilitar o desenvolvimento de simulações nesta linguagem.

### **2.1.3 O Período da Formação**

Durante este período, os conceitos foram revisados e redefinidos a fim de promover uma representação mais consistente dos objetos do mundo real. A maioria das Linguagens de

Programação de Simulação ganharam maturidade e passaram a ser utilizadas mais amplamente (BANKS, 2001).

O rápido desenvolvimento do *hardware* e o aumento das exigências por parte dos usuários forçaram algumas linguagens, especialmente o GPSS, a sofrer grandes revisões. Foi criado o GPSS/360, destinado a rodar sobre o sistema 360 da IBM que, devido a sua popularidade, forçou pelo menos seis outros fabricantes de hardware a desenvolver suas próprias versões do GPSS (BANKS, 2001).

No entanto, o maior avanço obtido pelas linguagens de programação de simulação foi alcançado pelo SIMSCRIPT II, que criou uma linguagem com sintaxe semelhante ao inglês com objetivo de facilitar o trabalho e a compreensão dos usuários (BANKS, 2001).

Na Europa, o SIMULA adicionou conceitos de orientação a objetos como classes e herança tornando-se um dos precursores das linguagens de programação orientadas a objeto utilizadas hoje em dia (BANKS, 2001).

#### **2.1.4 O Período da Expansão**

Os maiores avanços obtidos pelo GPSS durante este período vieram de fora da IBM, na medida em que o sucesso da linguagem incentivou outros desenvolvedores a aumentar sua capacidade ou melhorar as plataformas de hardware (NANCE, 1995). Dentre estes, Julian Reitman, da *Norden Systems* (empresa ligada ao *Northrop Group Corp.*, que desenvolve sistemas para defesa naval), encabeçou o desenvolvimento do GPSS/NORDEN, um esforço pioneiro em desenvolver um ambiente visual, interativo e on-line (BANKS, 2001). Coube a James O. Henriksen da *Wolverine Software*, em 1977. O desenvolvimento do GPSS/H disponibilizado para a plataforma IBM e, posteriormente, para minicomputadores. Também foi notabilizado por apresentar uma performance variando de 5 a 30 vezes mais rápido que o GPSS padrão. Com a inclusão de uma ferramenta de depuração, tornou-se a principal versão do GPSS em uso atualmente (BANKS, 2001).



Alan Pritsker efetuou alterações ao GASP, lançando o GASP IV, em 1974. Foram incorporados eventos de estado em adição aos eventos de tempo, como forma de permitir a representação das alterações advindas de ações além daquelas advindas da passagem do tempo. Posteriormente, em 1975-1976 foi adicionada uma representação de fluxo de transações (NANCE, 1995).

Também durante este período foram envidados esforços na tentativa de simplificar a modelagem de processos. Foram feitas tentativas de desenvolver linguagens de alto nível utilizando SIMULA, capazes de permitir a definição de sistemas em linguagem natural, e que pudessem ser traduzidas automaticamente em comandos de computador (BANKS, 2001). No entanto, estes esforços levaram a limitações importantes quanto ao que poderia ser modelado, limitando o domínio da modelagem e permitindo sua aplicação somente em sistemas muito específicos (BANKS, 2001).

### **2.1.5 O Período da Consolidação e da Regeneração**

Este período foi caracterizado pela adaptação das linguagens de programação de simulação para microcomputadores e a capacitação para que um modelo pudesse ser executado em vários computadores simultaneamente.

Surgiram dois descendentes importantes do GASP: SLAM II, e SIMAN. O SLAM (*Simulation Language for Alternative Modeling*) procurou criar múltiplas perspectivas de modelagem, isto é, possuía uma perspectiva baseada no escalonamento de eventos, como no GASP, uma perspectiva de modelagem de redes de interação de processos e uma perspectiva de simulação de processos contínuos.

O SIMAN (*SIMulation ANalysis*) foi desenvolvido por C. Dennis Pegden como um projeto acadêmico e seu desenvolvimento durou dois anos (NANCE, 1995). A linguagem possuía um modelo genérico de modelagem como havia no GASP IV, mas também possuía uma componente de diagrama de blocos similar ao GPSS (BANKS, 2001). SIMAN foi à primeira linguagem de programação de simulação a ser executada no IBM PC e que podia ser executada sob as limitações do MS-DOS.

### **2.1.6 O Período dos Sistemas Integrados**

O período mais recente caracteriza-se pelo crescimento da utilização das linguagens de programação de simulação em computadores pessoais e pelo surgimento de pacotes de simulação com interfaces gráficas, animação e outras ferramentas de visualização. Muitos destes pacotes implementam analisadores estatísticos tanto para os dados de entrada, quanto para os dados de saída. A programação pode ser efetuada utilizando-se de diagramas gráficos com janelas específicas para cada elemento utilizado na simulação, onde é feito o preenchimento dos campos necessários, dispensando o analista de aprender uma linguagem de programação específica.

## **2.2 O FUTURO DA SIMULAÇÃO**

O ambiente do software para simulação é dinâmico (BANKS, 1998). Mudanças acontecem de forma rápida, acompanhando a evolução tecnológica tanto das linguagens de programação, quanto da evolução do hardware. As principais tendências que tem sido previstas são:

### **2.2.1 Aplicações sobre a Internet**

A internet fornece um ambiente propício a dois fatores: informação e colaboração. Ambos muito importantes e atrativos aos desenvolvedores de software para simulação. Também o conceito de simulação distribuída, onde vários computadores cada um executando uma parte da simulação, torna-se acessível (BANKS, 1998).

### **2.2.2 Integrações com Sistemas de ERP**

A simulação de sistemas de manufatura normalmente necessita de um grande volume de dados, geralmente disponíveis nos sistemas de ERP (*Enterprise Resource Planning*), que são sistemas que auxiliam no gerenciamento dos recursos dos sistemas de manufatura, baseados nos pedidos dos clientes e na capacidade de reposição dos estoques. Interfaces de acesso direto a estes dados permitirão a integração com os sistemas de simulação, permitindo, por exemplo, experimentos sobre a distribuição de carga e programação nestes sistemas.

### **2.2.3 Otimização das Rotinas**

Na medida em que a simulação tornou-se uma ferramenta comum, sistemas muito grandes têm sido modelados, resultando em tempos de processamento também muito grandes. Daí a necessidade de concentrar esforços no desenvolvimento de técnicas de otimização dos processos tradicionais de simulação (BANKS, 1998).

### **2.2.4 Programação Orientada a Objetos**

A programação orientada a objetos tem tido um relacionamento muito próximo da simulação. Os principais benefícios da orientação a objetos são a re-utilização de código e o encapsulamento. A re-utilização de código permite ao programador utilizar o mesmo código para uma variedade de propósitos semelhantes. Já o encapsulamento permite ao programador criar componentes com comportamento e características operacionais específicas, como por exemplo, um torno, uma esteira, um operador, etc.

## **2.3 SISTEMAS E MODELOS**

Um sistema consiste em um conjunto de componentes, ou entidades, que interagem umas com as outras, com o intuito de alcançar algum objetivo. Alguns exemplos de sistemas são hospitais, a estrutura de *check-in* em um aeroporto, sistemas de telefonia, a rede viária municipal, plantas de fábricas, entre outros. Sistemas podem ser pequenos, com poucas interações, ou muito grandes com dezenas ou centenas de componentes e com um modelo complexo de interações. Nestes casos, pode ser muito custoso fazer experimentos diretamente com o sistema. Um modelo é uma representação abstrata e simplificada de um sistema (SEILA, 1995), e representa os componentes mais importantes do sistema e a forma como eles interagem. Um modelo estocástico é um modelo cujo comportamento não pode ser previsto com exatidão, e que comporta-se de maneira aleatória. Muitos dos modelos utilizados em simulação são estocásticos e a descrição destes modelos inclui distribuições de probabilidade. Em sistemas de manufatura, por exemplo, as paradas de máquina por defeito ou o tempo necessário para reparo são desconhecidos, muito embora possam ser estimados com uma determinada probabilidade de acerto. Neste caso, o modelo de simulação necessita descrever a estrutura probabilística destes eventos.

Os modelos podem ser classificados como sendo matemáticos ou físicos. Sistemas matemáticos utilizam notação simbólica e equações matemáticas para representar o sistema (BANKS, 2001). Outra classificação possível é estática ou dinâmica. Uma simulação estática, também chamada de Monte Carlo, representa um sistema em um determinado ponto no tempo. Modelos de simulação dinâmicos representam as alterações de um sistema durante o tempo. A simulação de uma agência bancária no período de 10:30 às 16:00 é um exemplo de simulação dinâmica.

Sistemas de simulação podem ser classificados como discretos ou contínuos, dependendo da forma como as alterações de tempo são tratadas (SEILA, 1995). Nem sempre se pode dizer que um dado sistema é totalmente discreto ou totalmente contínuo, portanto os sistemas são classificados de acordo com o tipo que predomina.

### **2.3.1 Sistemas Contínuos**

Sistemas contínuos são aqueles em que as alterações das variáveis são infinitesimais ao longo do tempo, podendo ser representados por um conjunto de equações diferenciais. Neste caso, o programa de simulação faz a integração numérica das equações e obtém os resultados (SEILA, 1995). Um exemplo pode ser o nível de água em uma represa, como na figura 2. A água das chuvas que caem sobre a rede hidrográfica flui para o reservatório com uma velocidade que dependerá da largura das margens, o tipo de fundo dos rios, entre outras variáveis. A água sai do reservatório através dos dutos que levam a água até os geradores. Estes dutos têm seu fluxo controlado de acordo com a quantidade de energia elétrica que se deseja produzir. O nível resultante no reservatório varia a cada milissegundo em função das variações do fluxo em suas entradas e saídas.

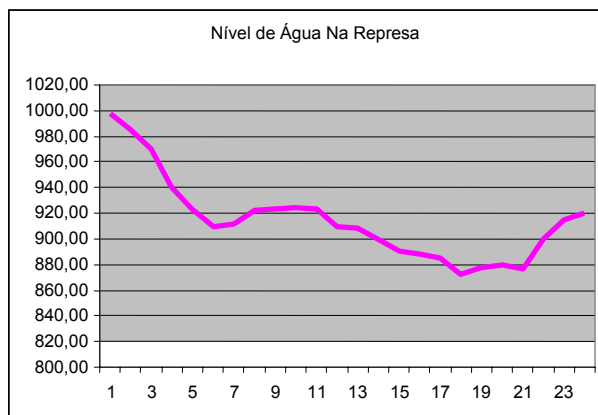
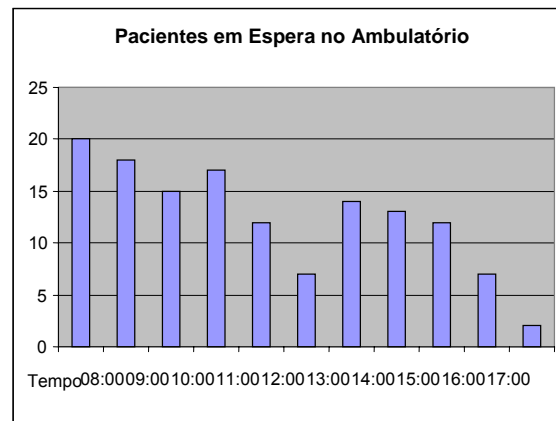


Figura 2: Exemplo de Sistemas Contínuos: Comportamento do nível de água em uma represa.

### 2.3.2 Sistemas Discretos

Sistemas discretos são aqueles em que o valor das variáveis de estado alteram-se em intervalos de tempo, quando ocorre um evento (BANKS, 2001; SCHIBER E BRUNNER, 1999; SEILA, 1995). Por exemplo, em um ambulatório médico, a quantidade de pacientes esperando atendimento é uma variável discreta, conforme pode ser observado na figura 3. Esta variável será alterada somente com a ocorrência de um dentre os três seguintes eventos: a chegada de um novo paciente, a liberação de um paciente após ter sido atendido pelo médico, ou ainda a desistência do atendimento.



**Figura 3: Exemplo de Sistemas Discretos: Quantidade de pacientes esperando atendimento em um ambulatório médico.**

Os sistemas de simulação de manufatura, pela natureza das variáveis envolvidas são, na maioria das vezes, sistemas discretos (BANKS, 2001). Na maioria dos casos, os postos de trabalho nos sistemas de manufatura medem sua produtividade em quantidades de peças por unidade de tempo. Devido a este fato, os elementos da simulação por eventos discretos serão discutidos a seguir.

## 2.4 ELEMENTOS DA SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS

Os conceitos de sistema e modelo já foram discutidos em sessões anteriores. Neste tópico, estes conceitos serão detalhados, segundo a visão de Banks (2001), sob o ponto de vista dos sistemas dinâmicos, com elementos que variam de forma randômica, e que se alteram em intervalos discretos de tempo. Diferentes pacotes de simulação podem utilizar terminologias diferentes para conceitos iguais ou similares.

**Sistema** – Consiste de uma coleção de entidades (pessoas, máquinas, esteiras) que interagem entre si para obter um ou mais resultados.

**Modelo** – É uma representação abstrata de um sistema, contendo os relacionamentos estruturais, lógicos e matemáticos que o descrevem em termos de seu estado, entidades, eventos, processos e tempos de espera.

**Estado do Sistema** – Consiste de uma coleção de variáveis que contém a informação necessária para descrever o sistema em um determinado ponto no tempo.

**Entidade ou Recurso** – Qualquer objeto ou componente do sistema que necessita ser representado explicitamente no modelo. Exemplos: um cliente, uma máquina, uma ferramenta, um caixa de banco, um operador de máquina, etc.

**Atributo** – As propriedades de uma determinada entidade. Por exemplo: a prioridade de atendimento de um dado cliente, o tempo de processamento de uma peça por uma máquina, etc.

**Lista** – Uma coleção de entidades associadas de alguma maneira, quer seja permanente ou temporária. Por exemplo: todos os clientes aguardando para ser atendidos pelo caixa de um banco.

**Evento** – Um acontecimento que altera o estado do sistema de maneira instantânea. Por exemplo: a chegada de um novo cliente para ser atendido pelo caixa de um banco. A finalização da confecção de uma peça por uma máquina, etc.

**Notificação de Evento** – O registro da ocorrência de um evento em um determinado instante atual ou futuro. O registro deverá conter todos os dados associados necessários para o processamento do evento. O registro deve incluir o tipo de evento e a hora exata em que ele deve acontecer.

**Lista de Eventos** – Também chamada de lista de eventos futuros consiste na relação de todos os eventos que irão acontecer, ordenados pela data e hora de sua ocorrência.

**Tempo de Atividade** – É o tempo que uma determinada atividade necessita para ser executada. Por exemplo, o tempo necessário para o atendimento do cliente no caixa do banco. Pode ser definido de forma absoluta ou em termos de uma distribuição estatística. O tempo de atividade pode ser especificado em uma das seguintes maneiras:

- *Deterministicamente*: por exemplo, sempre exatos 5 minutos.

- *Estatisticamente*: por exemplo, um dentre os seguintes valores 2, 5 e 7 minutos com igual probabilidade.
- *Função do Sistema*: Uma função que calcula o tempo em função das variáveis do sistema ou atributos das entidades. Por exemplo: o tempo de carga de um navio que depende da capacidade de carga das correias transportadoras.

**Tempo de Espera** – É um tempo não conhecido a priori, e que só pode ser determinado com a ocorrência de um determinado evento. Por exemplo: o tempo de espera de um cliente específico, que depende do tempo de atendimento daqueles que têm maior prioridade.

**Relógio** – Uma variável representando a velocidade da passagem de tempo na simulação. Pode ser ajustada para maior ou menor, quando se deseja observar a animação de um modelo.

De qualquer forma, a duração de uma atividade é sempre caracterizada de alguma maneira. Para efetuar o controle das atividades, o software cria uma notificação de evento para o tempo de término previsto para ele. Por exemplo, se um evento A tem duração exata de 5 minutos e ocorre no tempo  $t=100$ , então o software cria neste momento uma notificação de evento “final de evento A” para o tempo  $t=105$ .

Em contraste com o tempo de atividade, o tempo de espera não será especificado pelo analista que efetuou o modelou, mas determinado pelas condições operacionais do sistema. Muitas vezes este tempo pode ser o próprio objetivo do experimento. O tempo de espera finaliza quando um determinado evento, ou conjunto de eventos ocorre, e pode depender das condições operacionais do sistema. Por exemplo, o tempo que um cliente leva para ser atendido dependerá do número de clientes que estão à sua frente para ser atendidos, do tempo de atendimento (tempo de atividade) de cada um deles e da quantidade de recursos disponíveis para o atendimento dos clientes.



### **3. PLANEJAMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE SIMULAÇÃO**

Para o planejamento de experiências de simulação em computadores, é necessária a utilização de recursos da estatística, matemática, análise numérica, programação de computadores e projeto experimental (NAYLOR, 1971). Naylor sugere que o planejamento de experiências de simulação envolva a seguintes etapas:

- 1) Formulação do problema;
- 2) Coleta e processamento de dados reais;
- 3) Formulação de um modelo matemático;
- 4) Estimativa de parâmetros para as características operacionais, utilizando dados reais;
- 5) Avaliação do modelo;
- 6) Formulação de um programa de computador;
- 7) Validação;
- 8) Projeto de experiências de simulação;
- 9) Análise dos dados obtidos na simulação.

Ressaltando que a ordem das etapas pode variar ligeiramente, dependendo da natureza do sistema sendo simulado, e de questões práticas relativas a ele, Naylor (1971) sugere o fluxograma da figura 4. Isto levando em consideração que já se tenha tomado a decisão de utilizar a simulação como técnica para resolver o problema. No entanto, ainda segundo Naylor, é necessário antes verificar a aplicabilidade da simulação como ferramenta para um dado problema. Esta consideração deve repousar em três considerações principais:

aplicabilidade, custo e simplicidade. Esta avaliação pode ser feita respondendo-se as seguintes perguntas:

- *Primeira*: a simulação é realmente o processo de mais baixo custo que pode ser empregado?
- *Segunda*: é possível obter uma solução exata ou uma aproximação satisfatória para o problema?
- *Terceira*: a técnica utilizada para a simulação permitirá uma interpretação relativamente fácil, por parte dos usuários do estudo?

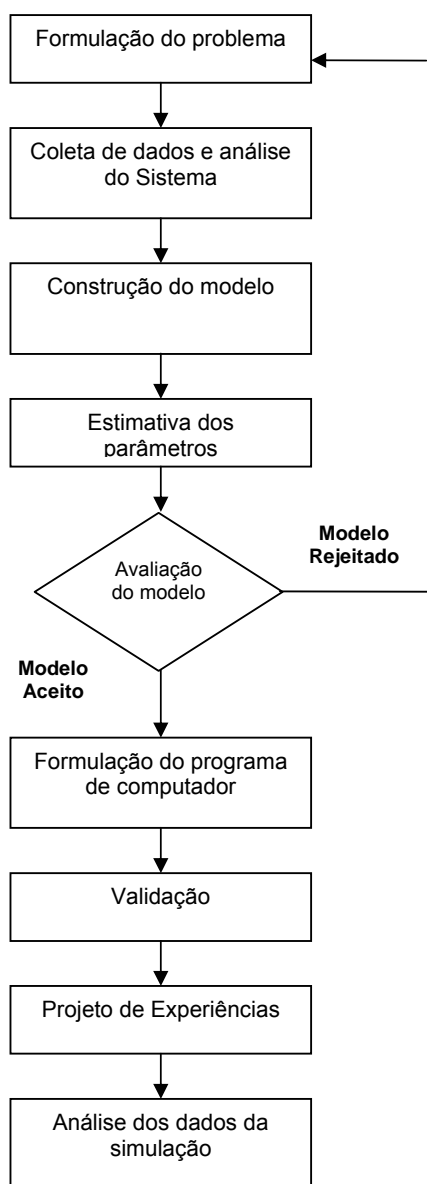


Figura 4: Fluxograma para o planejamento de experiências de simulação (NAYLOR, 1971, p 35)

### 3.1 ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE EXPERIÊNCIAS DE SIMULAÇÃO

Conforme já foi dito, o desenvolvimento de experiências de simulação ocorre normalmente em diversas etapas, cujos objetivos estão descritos abaixo:

#### 3.1.1 Formulação do Problema

Consiste numa definição explícita dos objetivos da experiência. Esta definição, no entanto, pode sofrer refinamentos durante o decorrer da experiência. Normalmente, os objetivos de uma pesquisa são:

- Quais perguntas deverão ser respondidas pela simulação;
- Hipóteses a serem testadas;
- Efeitos a serem testados.

#### 3.1.2 Coleta de Dados e Análise do Sistema

As informações descritivas e quantitativas a respeito de um sistema fornecem um suplemento importante na caracterização do mesmo. É necessário tomar conhecimento profundo de todas as operações realizadas bem como dos dados gerados e processados por elas. Quanto aos dados coletados pode-se afirmar que:

- São intrinsecamente relacionadas com a própria formulação do problema, sugerindo quais os dados mensuráveis do mesmo;
- Podem sugerir hipóteses que poderão ser usadas na formulação, melhoria e refinamento dos modelos matemáticos que descrevem o comportamento do sistema;
- Podem ser usados na estimativa de parâmetros das características operacionais do sistema;
- São imprescindíveis para a validação do modelo de simulação.

Se o sistema em questão já existe, é necessário um estudo cuidadoso incluindo observação da sua operação e entrevistas com o pessoal envolvido. Nesta etapa pode-se recorrer a fontes de documentos das agências do governo, organizações internacionais, registros de contabilidade e de engenharia de empresas privadas ou organizações de pesquisa. Neste ponto, os componentes do sistema bem como suas interações devem ser identificadas e descritas em detalhes. Se possível todos os parâmetros de entrada e as variáveis aleatórias envolvidas devem ser identificadas e descritas (SEILA, 1995).

### 3.1.3 Construção do Modelo

Esta etapa refere-se à formulação de uma ou mais hipóteses acerca do funcionamento do sistema e a redução destas hipóteses a um nível de abstração que permita a formulação do modelo. Por não se tratar de uma ciência exata, é um processo de *ensaio-e-erro* onde a experiência do projetista é fundamental. Pacotes de sistemas integrados direcionados à simulação em segmentos específicos são um grande auxílio na construção destes modelos. Em muitos já se encontram disponíveis elementos funcionais que permitem representar o comportamento genérico de máquinas, esteiras e outros elementos. Consiste nas seguintes etapas:

- Especificação de componentes;
- Especificação das variáveis e dos parâmetros;
- Especificação das relações funcionais.

O modelo resultante deve ser uma representação simplificada do sistema, mas que inclua detalhes suficientes para descrever com uma boa aproximação o comportamento do mesmo (SEILA, 1995).

Uma consideração importante diz respeito ao número de variáveis que devem ser incluídas no modelo. Devem ser consideradas as variáveis endógenas, que geralmente constituem-se no próprio dado que se quer analisar, bem como nas variáveis exógenas – algumas das quais de natureza estocástica – que afetam as endógenas. Um número demasiadamente pequeno de variáveis exógenas pode ter como consequência um

modelo não válido, por outro lado um número muito grande delas pode inviabilizar o processamento, em virtude das limitações no estado da arte dos computadores, ou tornar os programas de cálculo demasiadamente complicados.

### **3.1.4 Estimativa dos Parâmetros e das Características Operacionais**

Tendo coletado dados e criado um ou mais modelos que descrevem o comportamento do sistema, as etapas a seguir são estimar os valores para os parâmetros dos modelos e testar sua significância. Por exemplo, em uma simulação de um sistema econômico, pode-se ter encontrado como um dos parâmetros o nível mensal de inflação. Para que se possa processar a simulação, é necessário especificar o comportamento estatístico da inflação e estimar sua variação com um determinado grau de incerteza, tomando como base dados históricos.

### **3.1.5 Avaliação do Modelo**

Neste ponto, é necessário verificar a suficiência do modelo desenvolvido, uma vez que pouco se tem a ganhar utilizando um modelo inadequado. No caso de características operacionais que envolvam distribuições estatísticas, pode ser necessário fazer os testes para verificar até que ponto uma dada distribuição de probabilidade se adapta aos dados reais dos quais foi deduzida. Algumas perguntas poderão auxiliar nesta etapa, como por exemplo:

- Todas as variáveis que foram incluídas no modelo são pertinentes? Variáveis que pouco ou nada colaboram para a obtenção dos objetivos da simulação podem ter sido incluídas;
- Todas as variáveis exógenas foram incluídas? Variáveis importantes num dado processo podem ter deixado de ser representadas no modelo;
- As relações funcionais entre os componentes do sistema foram corretamente formuladas?

- As estimativas dos parâmetros e das características operacionais do sistema foram avaliadas convenientemente?
- As estimativas dos parâmetros são estatisticamente significativas?
- Baseando-se em cálculos manuais, como podem ser comparados os valores das variáveis endógenas do sistema com seus valores históricos ou reais?

Uma vez respondidas de forma satisfatória, pode-se validar o modelo e passar a codificação do mesmo. Caso seja constatado que algum parâmetro ou variável foi deixado de fora, ou mal dimensionado, estes poderão ser incluídos ou ajustados, podendo ser necessário retornar ao início do processo.

### 3.1.6 Formulação do Programa de Computador

A natureza deste passo irá depender grandemente do software utilizado para a implementação da simulação. Há possibilidade de optar por um dos seguintes métodos:

**Linguagens de propósito geral e bibliotecas de simulação** – neste processo utiliza-se uma linguagem de propósito geral como FORTRAN, Pascal, C, C++, Algol, etc para a codificação do processo. Pode-se utilizar em conjunto com a linguagem uma biblioteca contendo rotinas específicas para simulação. Este método tem como vantagem o fato de ser relativamente barato, sem a necessidade de o programador ter de aprender uma nova linguagem. Além disto os programas apresentam uma performance de processamento bastante expressiva. A desvantagem fica por conta do tempo de desenvolvimento;

**Linguagens de programação de simulação** – pode-se utilizar uma linguagem de programação específica para simulação como SIMULA, GPSS, SIMSCRIPT, SIMPAC entre tantos outros. Com elas, o tempo de codificação pode ser reduzido à metade, por já conterem comandos específicos e rotinas comumente utilizadas em simulação;

**Sistemas de programação interativa** – consistem em uma tentativa de automatizar o processo de programação por meio da conversão de um modelo gráfico descritivo do sistema, parecido com um organograma ou fluxograma, em um programa de simulação. Exemplos deste tipo de programa são o SIGMA, CAPS/ECSL. Depois de gerado, o programa pode ser alterado por um programador, porém não há esta necessidade. Um analista pode executar uma simulação sem dar atenção ao código que foi gerado;

**Sistemas visuais interativos** – a tendência atual nos softwares de simulação, utiliza capacidades gráficas dos computadores. O usuário utiliza-se de ícones com os quais monta uma representação gráfica do sistema, procurando representar o modelo físico do mesmo. Quando a simulação é executada, pode-se visualizar uma animação que representa o sistema em atividade. O modelo é também traduzido para uma linguagem intermediária, que pode ser verificada e editada. Alguns exemplos incluem o ProModel, Arena, WITNESS e SIMFACTORY.

### 3.1.7 Validação

A validação consiste na certificação de que o modelo implementado representa, de forma confiável, o comportamento do sistema. Duas perguntas devem ser respondidas: primeiro, até que ponto os valores simulados das variáveis endógenas são comparáveis aos dados históricos? Segundo, quão precisas são as previsões do comportamento do modelo de simulação? Testes estatísticos clássicos devem ser aplicados para aferir precisão e intervalos de confiança para as variáveis de interesse (BANKS, 2001).

Este pode ser um processo mais ou menos difícil de ser efetuado, dependendo da natureza e da complexidade do sistema (LAW E McCOMAS, 2001). Por exemplo: a simulação do funcionamento de uma Agência Bancária pode ser facilmente verificada comparando-se os resultados do modelo com aqueles observados em uma agência real. Por outro lado, a validade da simulação de um novo artefato militar que está sendo desenvolvido para entrar em operação em dez anos será virtualmente impossível de

verificar, uma vez que as condições de uma possível batalha bem como a natureza das armas do inimigo são desconhecidas.

Não existe um modelo perfeitamente válido (LAW E McCOMAS, 2001). A simulação de um sistema complexo será somente uma aproximação do sistema real. Quanto mais tempo é empregado na validação do modelo, mais próximo ele chegará ao comportamento real do sistema, o que leva a uma decisão envolvendo custo-benefício, tendo em mente que um modelo de simulação deve ser desenvolvido somente para responder às questões para as quais ele foi desenvolvido. Um modelo válido para um determinado objetivo pode não ser válido para outro.

Os procedimentos de validação devem ser considerados em todas as etapas anteriores, e as correções devem ser efetuadas assim que possível, evitando que erros sejam propagados para as etapas posteriores. As medidas efetuadas nesta etapa servem para certificar o modelo.

### **3.1.8 Projeto de Experiências de Simulação**

Nesta etapa, o modelo já desenvolvido e acreditado é utilizado para execução de experimentos. Várias combinações dos parâmetros de entrada podem ser utilizadas para que sejam testadas as condições operacionais do sistema. Testes poderão ser feitos, alterando condições operacionais, aumentando ou diminuindo os fatores de interação entre os recursos, sem a necessidade de dispendir recursos financeiros. Nesta fase, o modelo é efetivamente utilizado para verificar hipóteses e auxiliar na tomada de decisão.

### **3.1.9 Análise de Dados Provenientes da Simulação**

Na etapa final os dados gerados pelo computador são analisados, por meio das seguintes etapas:

- Coleta e processamento dos dados da simulação;



- Organização da estatística dos testes;
- Interpretação dos resultados.

Com frequência utiliza-se a simulação para comparar duas ou mais alternativas de configuração de um sistema e determinar qual delas apresenta a melhor performance. Métodos estatísticos de comparação podem ser utilizados para estabelecer um ranking entre as configurações testadas. Outras vezes utiliza-se a simulação para fazer otimizações na performance do sistema, alterando variáveis e parâmetros operacionais.

A apresentação destes dados pode ser feita com a utilização de planilhas contendo os valores dos resultados obtidos, ou por meio de gráficos. Muitas vezes a animação do sistema, demonstrando a interação entre os componentes do mesmo, permite a obtenção de dados a respeito dele e a tomada de decisões.

## 4. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA

Sistemas de manufatura e de controle de material são uma das aplicações mais importantes da simulação (BANKS, 2001). O objetivo da simulação é o entendimento de como será o funcionamento de um sistema depois de alguma modificação. A modificação pode ser a obtenção de uma nova máquina ou recurso, mudanças de leiaute, re-aloções de mão de obra ou mesmo várias condições de carga do sistema. A análise poderá ser feita tomando as alterações uma a uma ou um conjunto delas. O que se deseja saber é, dado as alterações efetuadas, qual será o resultado na performance do sistema? O que acontece nos períodos de pico? Quais são as novas necessidades de mão de obra? Qual é a capacidade do total do sistema? Qual o tempo de processamento unitário de um determinado item de produção? Qual o tamanho das filas nos diversos pontos de produção? Entre muitos outros.

Tradicionalmente, a simulação tem sido utilizada somente durante a fase de projeto do leiaute dos sistemas de produção, no entanto, cada vez mais tem se percebido que a simulação pode ser uma ferramenta poderosa inclusive durante a fase de operação (WILLIAMS, 1997; BANKS, 1998). No rastro da tendência atual do desenvolvimento de produtos cada vez mais personalizados e atendendo à necessidades específicas dos consumidores, faz-se necessário que os sistemas de manufatura, de forma geral, tenham a capacidade de reorganizar-se rapidamente, a fim de obter maior produtividade, reduzindo custos, aumentando as cotas de produção, diminuindo estoques intermediários e gargalos de produção. Neste sentido, a simulação pode ser uma importante ferramenta, especialmente se integrada nos ambientes operacionais como um todo, e nos softwares de gestão como MRP e ERP (WILLIAMS, 1997; BANKS, 1998).

A simulação tem sido utilizada com sucesso como uma ferramenta de auxílio no projeto de plantas de produção, depósitos e centros de distribuição. Alterações relativas ao refinamento dos processos de produção e distribuição de materiais podem ser testados exaustivamente antes de um investimento financeiro em máquinas, recursos ou alterações de *leiaute*.

Dentre as várias variáveis que são consideradas neste tipo de sistema, estão a quantidade e a disposição física de máquinas, esteiras, transportadores e equipamentos de apoio, a localização e o dimensionamento de estoques intermediários, além dos funcionários que farão a operação do sistema. Normalmente se deseja que o tempo de processamento de um item seja o menor possível, o que resulta, normalmente, uma maior capacidade de processamento do sistema. Tipicamente, 80% a 85% do tempo de processamento de um item corresponde a tempos de espera (BANKS, 2001), normalmente associados a tempos de transporte ou gargalos, e afetam diretamente a eficiência de um sistema de manufatura. A redução dos tempos de espera, portanto, pode resultar em grandes economias. Por outro lado, o aumento da eficiência geral de um sistema pode permitir o atendimento de maiores demandas de produção.

Uma das variáveis mais importantes nos sistemas de manufatura é o elemento humano. Örtengren (1992) afirma que até 30% do valor de mercado de uma empresa é representado pelas pessoas que nela trabalham. O custo de um trabalhador que se ausenta por uma hora de seu posto de trabalho, varia de 80% a 300% do seu custo/hora. Rampersad<sup>7</sup> (1994 apud GUIMARÃES *et al.*, 2003) comenta que em sistemas de montagem, que empregam um grande percentual de mão de obra, os custos relacionados à mão esta representam 20% do custo do produto final. Apesar da sua importância, o elemento humano é uma variável que é considerada com o mesmo enfoque de uma máquina, ou outro recurso, ao qual se atribui uma capacidade média de produção, apesar de toda a variabilidade inerente ao ser humano. Esta visão estanque do papel o ser humano nos processos de manufatura é característica da visão tecnicista das engenharias, inclusive da engenharia de produção.

---

<sup>7</sup> RAMPERSAD, H.K.. (1994) – *Integrated and Simultaneous Design for Robotic Assembly*. John Wiley & Soons, Ltd.

A introdução de estruturas flexíveis de trabalho redefiniu o papel do trabalhador nos sistemas de manufatura (FREUDEMBERG E HERPER, 1998). Tradicionalmente, um trabalhador executa uma série de tarefas de forma repetitiva, de acordo com um planejamento estabelecido por uma supervisão ou gerência, e sem muita flexibilidade quanto a sua execução. De fato, este planejamento reside sob uma relação de hierarquia, onde o hierarquicamente superior comanda as tarefas do hierarquicamente inferior. Nos sistemas flexíveis, o próprio trabalhador, em conjunto com seu grupo de trabalho, pode determinar a ordem e a maneira em que as tarefas são executadas, o que contribui para o enriquecimento do trabalho. Esta situação de atribuição de maior responsabilidade e flexibilização das tarefas resultaram em um gradativo deslocamento do foco da carga de trabalho, de estritamente física, para uma maior carga cognitiva nos sistemas de produção (GUIMARÃES, 2004). Este deslocamento representa, por fim, uma menor previsibilidade e, em consequência, maior dificuldade para ser modelado.

#### 4.1 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE SIMULAÇÃO DE MANUFATURA

Quanto à classificação dos sistemas, discutida nos itens 2.3.1 e 2.3.2, os sistemas de manufatura podem ser considerados, na maioria dos casos, como sistemas discretos, uma vez que a maioria das variáveis envolvidas nos processos de manufatura, como quantidades de peças processadas por um determinado equipamento, filas de materiais a espera de processamento, estoque de matéria prima, embalagem de produtos prontos, envio de produtos acabados ou semi-acabados, entre tantos outros, alteram seu estado em intervalos através do tempo.

Existem vários pacotes de software de simulação por eventos discretos que podem ser utilizados para o desenvolvimento de modelos em aplicações de sistemas de manufatura. O que se tem observado nos últimos anos é um interesse crescente em sistemas com uma maior facilidade de uso, que exigem um tempo menor para a construção dos modelos (LAW E McCOMAS, 1998). Neste tipo de sistema, o usuário pode criar o modelo utilizando uma interface gráfica, onde os diversos componentes são acessados e montados por meio de um processo de “clique e arrastar”, ao invés de utilizar uma linguagem de programação.

A desvantagem neste tipo de ambiente fica por conta da flexibilidade. Uma linguagem de programação permite que virtualmente qualquer situação possa ser simulada enquanto que nos modelos em que se utiliza um ambiente gráfico, os diversos componentes, como máquinas, materiais, esteiras, etc, já tem suas características pré-programadas, tendo somente que ser ajustadas à situação que se está modelando. Esta perda na flexibilidade é compensada por dois aspectos: o fato de o software ser construído especificamente para simular sistemas de manufatura, sendo, portanto construído especificamente para atender os problemas que normalmente se encontram neste tipo de sistema, e a possibilidade de parametrizar os componentes do modelo, atribuindo valores a variáveis relacionadas a eles e que determinam seu comportamento. Obtém-se, assim, um ambiente onde a programação é efetuada de forma interativa (LAW E McCOMAS, 1998).

Alguns exemplos de pacotes de software utilizados para a simulação de sistemas de manufatura são o ProModel, Arena, AweSim!, Extend, GPSS/H, Micro Saint, MODSIM III, SES, Taylor II, WITNESS, entre outros (LAW E McCOMAS, 1998).

Ainda que a simulação possa responder, de forma objetiva, com medidas numéricas relacionadas a um dado sistema que opera sob determinadas condições, o maior benefício da simulação é o entendimento do sistema concernente a suas condições de operação, especialmente se o software de simulação permitir a visualização por meio de animação gráfica. Muitas vezes, a visualização é o principal auxiliar para que um modelo ganhe aceitação, dando credibilidade aos resultados numéricos (BANKS, 2001).

#### 4.2 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SISTEMAS DE MANUFATURA

Um modelo de simulação é uma forma alternativa para experimentos reais dentro dos sistemas de manufatura, em função dos altos custos muitas vezes envolvidos em simulações com sistemas reais. Assim, é importante que um analista determine a validade ou não do modelo de simulação e o quanto este é preciso. É extremamente importante que o sistema possa ser validado para que os gerentes do sistema possam ter confiança no mesmo, antes de alguma tomada de decisão (LAW E McCOMAS, 1998).

Seguem algumas técnicas importantes para (i) determinar o nível apropriado de detalhamento do modelo (uma das questões mais difíceis quando se modela um sistema complexo), (ii) validar o modelo de simulação e para (iii) desenvolver um modelo com uma alta credibilidade (LAW E McCOMAS, 1998):

- Estabelecer firmemente as questões a serem verificadas e as medidas de performance desejadas logo no início do projeto do modelo;
- Coletar informações sobre o leiaute do sistema e os procedimentos operacionais, por meio de entrevistas com especialistas no sistema;
- Delinear toda a informação sobre o sistema e um resumo dos dados em um “documento de suposições”, que será o principal documento do sistema.
- Interagir constantemente com os gerentes do sistema para assegurar-se de que o problema correto está sendo resolvido e aumentar a credibilidade do mesmo;
- Executar uma verificação estruturada passo-a-passo (antes que qualquer programação seja efetuada) do modelo conceitual, alicerçado pelo “documento de suposições”, juntamente com os gerentes do sistema;
- Utilizar o método da análise de sensibilidade (*sensitivity analyses*) (WILLIAMS<sup>8</sup>, 1994 apud LAW E McCOMAS, 1998) para determinar fatores importantes no modelo, e que deverão ser modelados com mais cuidado.
- Se o modelo que está sendo simulado existe, efetuar simulações e comparar os resultados obtidos pela simulação com aqueles obtidos pelo sistema real.

#### 4.3 QUESTÕES ESTATÍSTICAS NA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA

Muitas das variáveis de entrada de um sistema de simulação de manufatura tem um comportamento aleatório no tempo. Portanto, as variáveis de saída do modelo, que são calculadas a partir das de entrada, também são aleatórias. Daí, a necessidade de modelar a aleatoriedade do sistema de maneira correta, assim como a programação e a análise dos experimentos. Seguem algumas variáveis de natureza aleatória com relação ao tempo que necessitam serem simulados em sistemas de manufatura:

---

<sup>8</sup> Williams, E. J. Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference: *Downtime Data – Its Collection, Analysis, and Importance* J. D. Tew, S. Manivannan, D. A. Sadowski, and A. F. Seila eds.

- Chegadas de pedidos, peças ou matéria prima;
- Tempos de processamento, montagem ou inspeção;
- Tempos de falha de máquinas e equipamentos;
- Tempos de reparo de máquinas e equipamentos;
- Tempos de carga e descarga;
- Tempos de *setup*.

Cada uma das fontes de aleatoriedade do sistema devem ser modeladas por uma distribuição de probabilidade apropriada, e não somente por valores médios. Em geral, as fontes de aleatoriedade encontradas em sistemas reais dificilmente são distribuições normais.

## 5. SIMULAÇÃO DO TRABALHO HUMANO

Existem sistemas de simulação para avaliar a atuação do ser humano em postos de trabalho que permitem que se façam ajustes necessários à melhor adequação do posto de trabalho. Neste tipo de sistema, o foco é a biomecânica relacionada ao trabalho, sendo dotados inclusive de “humanos virtuais”, que são capazes de simular com precisão, todos os movimentos que um ser humano é capaz de realizar (BADLER, 1997). Exemplos deste tipo de sistema são o *Jack* e o *HUMOSIM*, utilizados principalmente por ergonomistas e *designers*.

Este tipo de simulador pode calcular com precisão, a quantidade de produção por unidade de tempo de um determinado posto de trabalho. No entanto, ele não é capaz de calcular a produção de um conjunto de postos de trabalho interligados, como é uma planta industrial. Para isto são utilizados sistemas específicos de simulação de manufatura, que enfocam aspectos como tempos de máquina, tempos de transporte, taxas de consumo de matérias primas e de produção, além de outros aspectos relacionados à produtividade. Já estes sistemas representam máquinas detalhadamente, enquanto representam o trabalhador humano de forma bastante simplificada (BAINES *et al.*, 2003). Isto representa um problema quando se está modelando um sistema com um alto índice de mão de obra, como linhas de montagem em geral, podendo resultar em uma grande disparidade entre os resultados previstos por um modelo de simulação e o desempenho real do sistema.

O foco das pesquisas para o aperfeiçoamento dos sistemas de manufatura concentra-se em aspectos tecnológicos (ERHARDT *et al.*, 1994). No entanto, a despeito do aumento do nível de automação na indústria, tarefas vitais no campo da produção ainda são atribuição



de mão de obra humana. Com o advento da automação e da mecanização dos transportes de materiais, grande parte do trabalho pesado e monótono, que era atribuído à mão de obra humana, foi sendo reduzida. No entanto, a mão de obra humana não pode ser totalmente substituída devido às seguintes características:

- Alta flexibilidade da mão de obra humana;
- Criatividade dos humanos;
- A dificuldade de automatizar certos processos.

Adicionalmente, o papel dos trabalhadores em uma companhia tem se alterado constantemente durante os últimos anos (FREUDENBERG E HERPER, 1998). Houve uma transição dos sistemas de manufatura organizados pelos princípios de Taylor/Ford, para sistemas de trabalho flexíveis e auto-organizados. Para ser capaz de estimar a efetividade deste tipo de sistemas, um modelo de simulação deve ser bastante detalhado, incluindo questões de mão de obra, custo e fatores ambientais (HERPER *et al.*, 1996). Critérios como a qualificação dos trabalhadores, a organização do trabalho, remuneração e estruturação do trabalho precisam ser mais integrados ao planejamento da produção de forma geral e, portanto, às ferramentas de planejamento.

Os pacotes de simulação convencionais permitem somente um controle de fluxo e processamento de materiais baseado em rateios, por meio de variáveis de estado que descrevem o fluxo de materiais e recursos em determinados locais e intervalos de tempo (HERPER *et al.*, 1996). Este tipo de controle não é suficiente para simular as novas estruturas de trabalho como células de produção e estruturas flexíveis de trabalho. Neste caso, é necessário que os resultados da simulação possam ser analisados sob diferentes aspectos e de vários pontos de vista, atendendo a diferentes grupos de usuários, como engenheiros de produção, ergonomistas e especialistas em recursos humanos. Herper (1996) refere-se a este processo como “interpretação multifuncional dos resultados da simulação”. O analista responsável pelo desenvolvimento do sistema de simulação precisa verificar quais questões necessitam serem respondidos aos diversos grupos de usuários, quais resultados adicionais devem ser gerados, quais dados de entrada adicionais precisam ser alimentados e como estes devem ser processados.

Portanto, é importante que os sistemas de simulação de manufatura, por serem mais abrangentes que os sistemas de biomecânica, incorporem cálculos relativos às variações da produção do ser humano em função de aspectos ergonômicos, como carga física de trabalho, tempos de trabalho e descanso, variações relacionadas a ciclos de tempo, como os ciclos circadianos, variações relacionadas às condições ambientais, como temperatura e ruído, variações relacionadas à capacitação a uma determinada tarefa, além de outros aspectos relacionados à própria organização do trabalho. Apesar de já existirem vários estudos estabelecendo técnicas de efetuar a simulação do trabalho humano, pouco disto já foi incorporado aos pacotes de simulação. De forma geral, um trabalhador é representado nestes modelos como um “recurso”, assim como um equipamento. Foram efetuadas algumas tentativas de agregarem módulos a sistemas já existentes, através da exportação de dados, de interfaces complexas de comunicação, ou através de customizações. Normalmente, estas são iniciativas isoladas e que representam um grande esforço de programação. Idealmente, um pacote de simulação deveria disponibilizar um recurso “trabalhador”, que fosse capaz de simular o comportamento, a flexibilidade e as limitações de um ser humano, emitindo relatórios de risco e desempenho.

Vários estudos foram realizados objetivando uma análise mais detalhada das questões relativas ao trabalho humano, a fim de que estas possam ser incluídas nos modelos de simulação. Destacam-se os estudos com fins militares, com fins de controle de vôo e tráfego aéreo, e os relacionados ao controle da produção em sistemas de manufatura. Alguns destes trabalhos em cada uma destas áreas estão destacados a seguir:

## 5.1 ESTUDOS COM SISTEMAS MILITARES

- *Micro Analysis & Design, Northrop Grumman Corporation e Lockheed Martin* GES estudaram as limitações impostas por operadores humanos na realização de tarefas em um *Destroyer* modelo DD21 da Marinha Americana, cujo objetivo era o de dar cobertura a operações em terra. Várias tarefas essenciais executadas por equipes de três ou quatro operadores, cujas interações foram modeladas pelo software de simulação Micro Saint (WETTELAND *et al.*, 2000).

- *British Centre fo Human Sciences e Micro Analisys & Design* desenvolveram um ambiente para a modelagem do desempenho humano, com o objetivo de determinar relações de custo-benefício entre sistemas manuais e automatizados em projetos militares (DAHAN E LAUGHERY, 1997).
- *US Army Engineer Research and Development Center* desenvolveu um estudo sobre os efeitos nocivos do frio sobre o desempenho de soldados. Foram estudadas questões relativas à coordenação motora ampla e fina, bem como sobre a diminuição das habilidades cognitivas resultantes da exposição à baixas temperaturas, para possibilitar a simulação de operações militares neste tipo de ambiente (PHETTEPLACE, 2000).

## 5.2 CONTROLE DE VÔO E TRÁFEGO AÉREO

- *Micro Analysis & Design* realizou um estudo para determinar questões do modelamento do desempenho humano em vários tipos de sistema onde o elemento humano é o elemento chave, como por exemplo pilotos de aeronaves, onde aproximadamente dois terços dos acidentes são relacionados a falhas humanas (LAUGHERY, 1998).
- *San Jose State University* realizou estudos para desenvolver um modelo da capaz de descrever o desempenho humano e prever as os resultados da utilização de novas tecnologias de controle de tráfego aéreo (CORKER, 1999).
- *Research Center for Air Navigation, Automatics Laboratory of Valenciennes'University e Psychology and Ergonomics of Cognition in Technological Environments* realizaram estudos de simulação para testar a utilização de alocação dinâmica de tarefas entre operadores humanos e sistemas especialistas no auxílio ao controle de tráfego aéreo (BES, 1999).

## 5.3 CONTROLE DE PRODUÇÃO

- *Otto-von-Guericke-University e Institute for Occupational Medicine* realizaram um projeto denominado EMSIG (*Ergonomic in Material flow Simulators InteGration*) com objetivo de modelar a esforço do trabalho manual em sistemas de manufatura e de logística, para uso em simulações (EHRHARDT *et al.*, 1994).
- *Basle Institute of Technology* realizou estudos para determinar como um sistema de manufatura e seus trabalhadores podem ser modelados e simulados, com o foco nos processos organizacionais de grupos de trabalho (BERNHARD E SCHILLING, 1997).
- *Otto-von-Guericke-University* realizou estudos para modelar e realizar simulações de trabalhadores inseridos em grupos flexíveis de trabalho (FREUDENBERG E HERPER, 1998).
- *Cranfield University e Ford Motor Company* realizaram estudos para modelar sistemas com um alto índice de trabalho manual, como linhas de montagem. Os efeitos da idade e dos ritmos circadianos sobre a performance dos trabalhadores foi modelada e inserida nos modelos de simulação a fim de que os resultados obtidos por simulação sejam mais próximos daqueles obtidos pelos sistemas reais (BAINES *et al.*, 2003).

Como o foco deste trabalho são os sistemas de manufatura, estes últimos trabalhos serão analisados de forma mais pormenorizada, objetivando demonstrar a importância das considerações ergonômicas e dos fatores humanos na simulação destes sistemas, e como estes poderão ser integrados aos modelos de simulação.

#### 5.4 O PROJETO EMSING – SIMULANDO A FADIGA RELACIONADA AO TRABALHO

O objetivo do projeto EMSIG, cuja estrutura geral é apresentada na figura 5, foi o de desenvolver uma ferramenta de simulação, capaz de fornecer informação relacionada ao esforço e às cargas que um trabalhador é submetido em um determinado posto de trabalho. A ferramenta foi desenvolvida para ser uma extensão a outras ferramentas ou linguagens de simulação (EHRHARDT *et al.*, 1994).

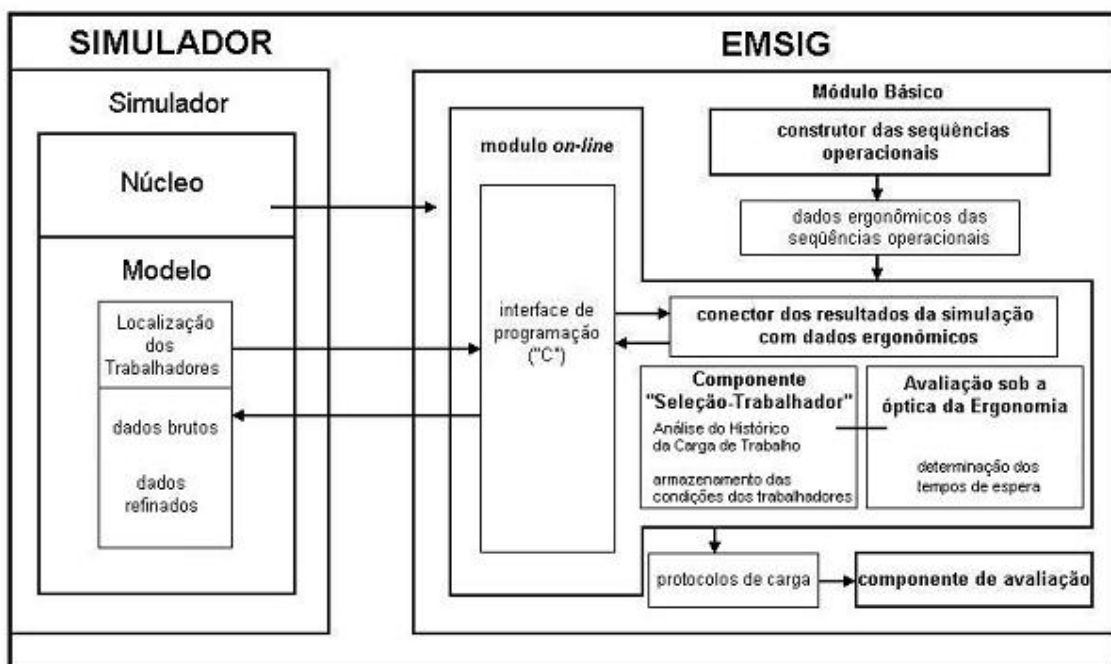


Figura 5: Estrutura básica do módulo de extensão EMSIG (Fonte: EHRHARDT *et al.*, 1994, p. 1047)

As principais causas de tensão e fadiga no trabalho manual podem ser divididas em duas classes: primeiro, são os fatores relacionados ao próprio trabalho sendo executado e segundo, são fatores relacionados às condições ambientais. A ferramenta desenvolvida levou em consideração os seguintes fatores:

- Fadiga causada pelo trabalho:
  - Carga muscular dinâmica;
  - Carga muscular estática;
  - Manipulação de objetos;
  - Postura do corpo.
- Fadiga causada por fatores ambientais:
  - Condições climáticas – temperatura;
  - Condições climáticas – radiação;
  - Ruído;
  - Vibrações;
  - Iluminação.

#### 5.4.1 Descrição dos fatores de esforço

**Carga muscular dinâmica** – caracteriza-se pela contração e distensão dos músculos e que resulta na realização de trabalho físico. A energia dispendida como resultado da oxidação celular é, em sua maioria (>90%), transformada em calor, influenciando, portanto também na fadiga causada por situações climáticas.

**Carga muscular estática** – neste tipo de carga, os músculos são utilizados para compensar uma força externa, como por exemplo, no transporte de materiais pesados ou no controle da postura do corpo. Nenhum trabalho no sentido físico é executado. Além disto, após curtos períodos de muito esforço estático são necessários períodos de descanso.

**Manipulação de objetos** – este tipo de carga é um misto de carga estática e dinâmica, onde o foco não está na energia dispendida, porém nos esforços espinais. Muitas vezes o levantamento de pesos resulta em um grande esforço da coluna vertebral.

**Condições climáticas** – condições climáticas são divididas em “temperatura” e “radiação”, uma vez que cada um dos casos implica em diferentes precauções: normalmente, as fontes de radiação podem ser isoladas enquanto que em caso de altas temperaturas, é necessário prover o resfriamento do ambiente. Ambos os fatores influenciam diretamente a frequência cardíaca.

**Ruído** – ruído pode ser definido como qualquer som indesejado. A medida do nível de ruído equivalente é uma combinação da frequência e intensidade do som. Altos níveis de ruído durante longos períodos de tempo representam um alto risco de perda da audição.

**Vibrações** – na maioria dos casos a causa das vibrações é o equipamento utilizado. A medida do nível equivalente de vibração é uma combinação de

três fatores: tipo da vibração (todo ou somente uma parte do corpo), frequência e intensidade.

#### **5.4.2 Base de dados de fatores ergonômicos**

A ferramenta desenvolvida foi provida de uma base de dados contendo a descrição de várias tarefas. Cada tarefa consiste em uma seqüência de atividades às quais são relacionadas o equipamento utilizado, se for o caso, e outras quantidades como o peso de objetos. Para cada seqüência de trabalho, foi provida uma série de dados ergonômicos com base no estudo de postos reais de trabalho. O usuário poderá, então, escolher qual a seqüência de atividades mais se aproxima à situação que está sendo simulada. Em torno de 200 seqüências estão disponíveis sendo, no entanto possível aumentar esta base de dados por meio da realização de novos experimentos.

#### **5.4.3 Interpretação dos dados ergonômicos**

As diversas questões ergonômicas analisadas têm um domínio específico com relação aos dados que eles produzem. Nesta etapa, estes dados são apresentados de uma maneira uniformizada, mostrando ao usuário qual é o nível de risco de uma determinada situação que está sendo simulada, demonstrando se a situação à qual o trabalhador está exposto é crítica ou não. Müller e Hettinger<sup>9</sup> (1981 apud EHRHARDT *et al.*, 1994) apresentam uma escala com sete níveis, onde os níveis de avaliação são transformados para uma escala de avaliação descritiva.

A figura 6 mostra algumas destas relações. Os valores limites para as faixas foram determinados com base na literatura e no conhecimento da ergonomia. Os valores de entrada são valores médios em todo o turno de trabalho. Para cada uma delas, a categoria IV estabelece a linha média, significando que a situação não deverá ser

---

<sup>9</sup> Müller B.H., Hettinger, Th., 1981. Interpretations und Bewertungsverfahren arbeitswissenschaftlich-ergonomischer Felddaten (Method for Interpretation and Evaluation of Ergonomic Data Based on Field Studies. In: Z. Arb. Wiss. 25, page 82 ff.

agravada. Acima da categoria IV, a situação é definida com crítica e deverá ser alterada. Abaixo desta categoria, a situação não é crítica.

Intensidade do estresse	Categoria	Carga de Trabalho AU [kJ/min]	Temperatura efetiva							Calor de radiação efetivo $E_{\text{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	Nível de ruído equivalente Lr [dB (A)]	Frequência cardíaca AP [1/min]	
			NET (°C)										
Excessivamente estressante	altamente provável	VII	AU > 25	40	36	33	30	28	26	25	$E_{\text{eff}} > 300$	$Lr > 95$	$AP > 52$
	provável	VI	$23 < AU \leq 25$	37	33	29	26	23	21	19	$260 < E_{\text{eff}} \leq 300$	$90 < Lr \leq 95$	$48 < AP \leq 52$
	possível	V	$20 < AU \leq 23$	33	31	27	23	19	15	11	$220 < E_{\text{eff}} \leq 260$	$85 < Lr \leq 90$	$42 < AP \leq 48$
Linha média		IV	$16 < AU \leq 20$	31	29	25	21	17	13	9	$180 < E_{\text{eff}} \leq 220$	$80 < Lr \leq 85$	$34 < AP \leq 42$
Estressante		III	$12 < AU \leq 16$	25	22	19	16	14	11	8	$95 < E_{\text{eff}} \leq 180$	$75 < Lr \leq 80$	$26 < AP \leq 34$
Pouco estressante		II	$8 < AU \leq 12$	19	17	15	13	11	8	7	$35 < E_{\text{eff}} \leq 95$	$65 < Lr \leq 75$	$17 < AP \leq 26$
Muito pouco estressante		I	$AU \leq 8$								$E_{\text{eff}} \leq 35$	$Lr \leq 65$	$AP \leq 17$
				I	II	III	IV	V	VI	VII			
				Categoria de Carga de Trabalho									

**Figura 6: Escala da categoria de risco à que está exposto um determinado trabalhador, segundo Müller e Hettinger (1981 apud EHRHARDT et al., 1994, p. 1046), utilizado no módulo de extensão EMSIG**

Se a situação for definida como crítica, várias ações poderão ser tomadas no sentido de melhorar a situação para o trabalhador. Uma delas poderá ser a determinação de períodos de descanso para os trabalhadores, o que influencia diretamente o *throughput* do sistema. Ehrhardt *et al.* (1994) demonstram que sistemas melhor planejados sob o ponto de vista ergonômico resultam em melhores resultados financeiros.

Este estudo foi efetuado considerando dados objetivos e mensuráveis. O próximo trabalho enfoca a questão da qualificação de um trabalhador para a execução de uma dada tarefa, dentro de uma estrutura de grupos de trabalho.

## 5.5 SIMULADO A QUALIFICAÇÃO DOS TRABALHADORES



Este projeto, realizado pela *Basle Institute of Technology* em conjunto com a “*Sulzer Rütli*”, uma empresa suíça fabricante de máquinas para tecelagem, descreveu como um sistema de manufatura poderia ser modelado e simulado, levando em conta a organização em grupos flexíveis de trabalho. De forma geral, uma empresa somente fará a reorganização de sua estrutura organizacional se perceber vantagens econômicas desta reorganização. A simulação pode ser uma das ferramentas para esta verificação.

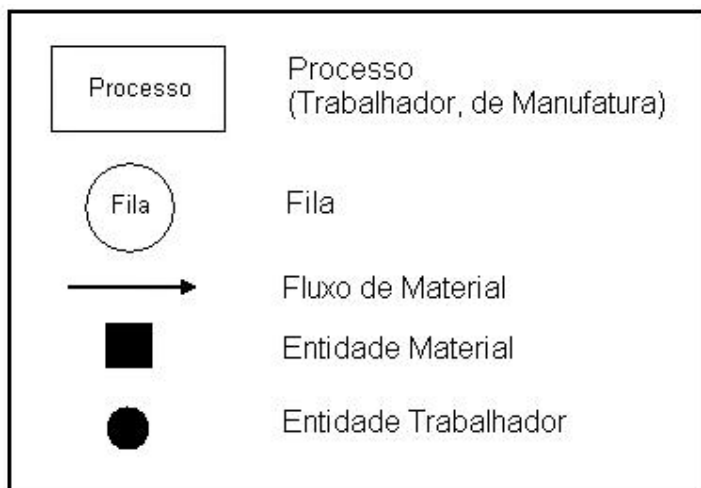
A organização em grupos de trabalho tem obtido um interesse crescente por parte das pequenas e médias organizações em razão do aumento da eficiência, flexibilidade e motivação dos trabalhadores envolvidos (BERNHARD E SCHILLING, 1997). Ao contrário dos sistemas tradicionais, em que a rotina de trabalho era determinada por supervisores e gerentes, na organização em grupos flexíveis de trabalho, são os próprios trabalhadores que organizam suas tarefas de forma independente. Cada trabalhador pode empenhar-se de forma mais acentuada nas suas próprias qualificações, o que aumenta sua motivação no trabalho.

Um dos objetivos do projeto era o de verificar o impacto da qualificação individual dos funcionários nos tempos de produção e no *throughput* do sistema. Para tanto, foi considerada a implementação de grupos flexíveis de trabalho no setor de montagem da empresa.

A simulação do fluxo de material dentro do sistema de manufatura é um processo bastante conhecido e sua aplicação em simulação por eventos discretos é bastante difundida. A maneira tradicional de tratar o trabalhador é modelá-lo como um “recurso”. Apesar de a maioria dos pacotes de simulação dispor do conceito de recurso, este é extremamente limitado para modelar o comportamento humano, por não possuir a capacidade de simular, por exemplo, aspectos psicológicos, a qualificação do trabalhador, características físicas, capacidade de aprendizado, resposta a condições adversas de trabalho, etc. No modelo desenvolvido por Bernhard e Schilling (1997) foi considerado desnecessário incluir aspectos psicológicos, já que os autores consideram difícil, ou até mesmo impossível, incluir mais do que a qualificação que um trabalhador possui para realizar uma dada tarefa. Portanto, cada trabalhador foi modelado como um processo isolado, no qual se pode identificar a capacidade de realizar uma determinada tarefa, de

forma plena ou parcial. Esta capacidade deve ser definida a partir de entrevistas com os trabalhadores.

A figura 7 mostra quais são os elementos necessários para definir a rede de processos no simulador proposto por Bernhard e Schilling (1997). Um processo pode realizar qualquer atividade, desde uma simples espera por um determinado intervalo de tempo, até uma ação complexa baseada em um sistema de tomada de decisão. A atividade de cada processo foi descrita através da linguagem SIMSCRIPT.

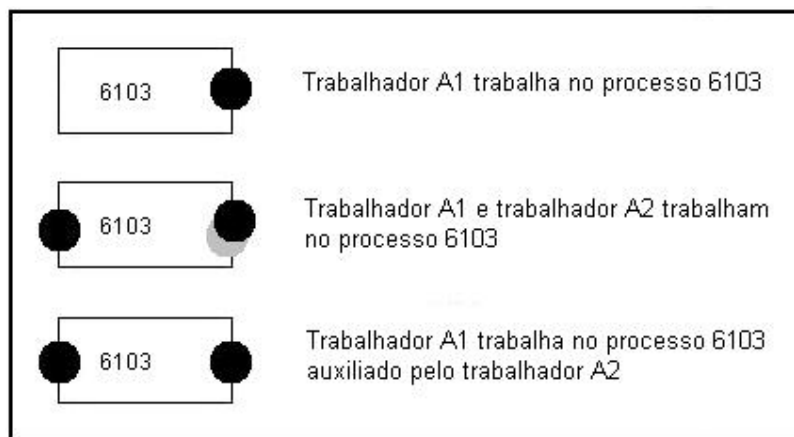


**Figura 7: Elementos da rede de processos para a construção do modelo  
(BERNHARD E SCHILLING, 1997, p. 889).**

Uma fila pode ser utilizada para armazenar entidades. Assim como um processo, uma fila poderá ter uma descrição em linguagem de programação, especificando o que acontece com uma entidade que entra na fila. Não é permitida a definição de tempos de espera em filas.

Uma seta define o fluxo de material. Os materiais são entidades dinâmicas que são visualizadas como objetos que se movem sobre o modelo. As entidades “trabalhador” também são entidades dinâmicas, mas com um formato diferente. Cada entidade trabalhador possui um processo associado e que a controla.

A figura 8 demonstra como os trabalhadores podem exercer atividades dentro do processo de manufatura. Uma entidade trabalhador posicionado sobre o lado direito do processo inicia um processo. A um determinado processo poderão ser alocados quantos trabalhadores forem necessários, conforme definido no modelo. Um trabalhador que não é totalmente qualificado para exercer uma atividade qualquer poderá auxiliar um trabalhador qualificado, e será exibido ao lado esquerdo do processo.



**Figura 8: Interação dos trabalhadores dentro do processo de manufatura (BERNHARD E SCHILLING, 1997, p. 889).**

Cada trabalhador é modelado como um processo que controla a entidade, chamado “processo trabalhador”. Este processo toma decisões de onde o trabalhador deverá trabalhar, baseado nas suas qualificações e no estado do sistema de manufatura. Assim que o “processo trabalhador” efetuou a decisão para a próxima tarefa, ele envia uma entidade trabalhador (que pode ser observado na animação) ao processo correspondente. Cada trabalhador possui uma qualificação específica para cada processo de manufatura.

Assim que um trabalhador completou sua tarefa, ele necessita fazer uma decisão de onde trabalhar em seguida. Para isto, ele terá de checar, primeiramente, cada um dos processos para os quais ele é qualificado, de acordo com uma prioridade definida no modelo. O processo selecionado deverá preencher os seguintes requisitos:

- A quantidade necessária de material para a realização da tarefa deverá estar disponível na fila de materiais correspondente ao processo;

- O número de trabalhadores totalmente qualificados para executar o processo é inferior ao estabelecido no modelo.

No caso destas condições não serem satisfeitas, o mesmo procedimento será executado para aqueles processos que o trabalhador é parcialmente qualificado, auxiliando um outro trabalhador qualificado. Se ainda assim não houverem condições de alocar o trabalhador, este ficará em estado de espera. A Figura 9 mostra uma imagem do modelo em execução.

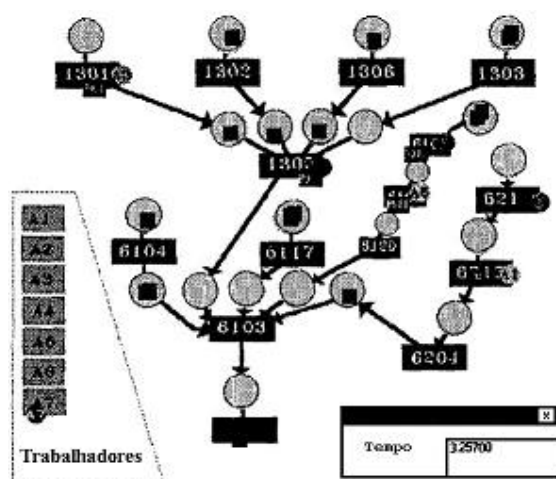


Figura 9: Imagem do modelo em execução (BERNHARD E SCHILLING, 1997, p. 890).

A utilização do modelo demonstrou que com a implementação de grupos flexíveis de trabalho, onde há um misto de trabalhadores totalmente qualificados com outros parcialmente qualificados para as tarefas, houve um aumento da produtividade de 348 para 491 máquinas, o que representa um incremento na produtividade de 41%. Utilizando-se trabalhadores totalmente qualificados para todas as tarefas, a produção subiu para 497 máquinas, o que é praticamente o mesmo resultado, com um maior custo para a empresa.

Neste estudo, os autores elegeram um aspecto da característica humana – a qualificação para uma dada tarefa – e obtiveram êxito na sua modelagem e simulação. Foi efetuada uma simplificação quanto a sua mensuração, considerando-a somente como “total” ou “parcial”, em prol da facilidade de simulação. Um modelo mais completo poderia considerar uma medida linear, numa escala entre 0 e 1, por exemplo. Além disto, poderia

considerar um aumento gradativo da qualificação em função do aprendizado que ocorre durante o tempo.

Freundenberg e Herper (1978) ampliam a análise, verificando também outros fatores, como cooperação e comunicação, autonomia de controle e inspeção, integração de funções e tarefas, entre outros. No entanto, sua implementação, que foi realizada através da utilização do pacote de simulação WITNESS, em conjunto com a linguagem de simulação GPSS/H, não é demonstrada.

## 5.6 SIMULANDO GRUPOS DE TRABALHADORES

Neste projeto do *Department of Computer Simulation and Graphics* da *Otto-von-Guericke University of Magdeburg* foi desenvolvido um modelo para simular trabalhadores em sistemas de manufatura, onde atributos com criação de valor, estresse mental e esforço físico são coletados e analisados, integrando-os a modelos de sistemas logísticos já existentes. Também aqui, um dos objetivos é o de fornecer suporte na implantação e planejamento de grupos flexíveis de trabalho, permitindo que, através da simulação, diversas configurações e estruturas de trabalho possam ser testadas (FREUNDEMBERG E HERPER, 1998).

Um dos problemas que se apresentam durante a fase de criação do modelo é a quantidade de fatores peculiares de cada organização, e que necessitam ser considerados para o desenvolvimento de uma solução específica. Para o modelamento dos grupos de trabalho, diferentes níveis de abstração poderão ser selecionados. Uma possibilidade é o de efetuar um modelo bastante genérico, capaz de ser utilizado nas mais diversas situações e criando uma base de comparação entre elas. Conseqüentemente, questões específicas de uma dada organização não serão respondidas com o nível de detalhe necessário, exigindo um grande esforço adicional para modelar uma situação real. Uma outra possibilidade é a de especificar uma lista de atributos aos quais poderão ser atribuídos pesos e graus de liberdade específicos para cada situação. Isto permite que aspectos característicos das organizações possam ser especificados, permitindo avaliar diferentes estruturas de trabalho.

O conceito de grupos de trabalho semi-autônomos permite que sejam especificadas algumas dimensões através das quais uma determinada situação poderá ser definida, como mostrado na figura 10.



**Figura 10: Características de Projeto de Estruturas de Trabalho  
(FREUNDENBERG E HERPER, 1998, p. 952).**

Integração de funções e atividades consiste na autonomia do planejamento e execução das tarefas, permitindo que a ordem das mesmas sejam gerenciadas pelos próprios trabalhadores. Estas atividades poderão ser executadas pelos grupos, cujos tamanhos podem variar de 5 a 15 trabalhadores, com diversos graus de liberdade. Além disto, outras atividades, como ajuda mútua na execução de tarefas, são consideradas pelos autores, mais difíceis de modelar.

A qualificação dos trabalhadores é outro aspecto importante a ser modelado em grupos flexíveis de trabalho, pois constitui a base para a tomada de decisão na execução das tarefas. O método usualmente empregado em simulação – “capaz de executar” ou “não capaz de executar” – é insuficiente neste tipo de experimento.

A especificação da entidade trabalhador corresponde à descrição dos dados necessários para modelar trabalhadores inseridos em estruturas flexíveis de trabalho, além das

relações entre eles. Esta especificação foi efetuada através de uma combinação de características formais e informais, e a descrição de interfaces entre a entidades trabalhador e as demais entidades que compõe um sistema de simulação. A interface, desenvolvida através do padrão HLA (*High Level Architecture for Modeling and Simulation*) que é um padrão de descrição de sistemas de simulação distribuídos, descreve os componentes, atributos e parâmetros necessários para a entidade trabalhador (Uma introdução à HLA pode ser obtida na página <http://www.pitch.se/hla/hlaforbeginners.asp>). A implementação das características necessita ser escrita em forma de algoritmos, utilizando uma linguagem qualquer, própria para simulação.

**Integração de funções e tarefas** – devido à integração de funções e tarefas, a variedade de decisões e tarefas atribuídas à classe trabalhador aumenta. Estas atividades deverão ser consideradas sob a óptica da qualificação dos trabalhadores e precisa ser incorporada à sua rotina de trabalho.

**Cooperação e comunicação** – a cooperação e a comunicação entre os trabalhadores pode ser modelada através de um componente central que se conecta a todos os outros elementos. Aí deverão ser implementadas estratégias de controle das várias formas de cooperação e estas deverão poder ser ajustadas a situações específicas.

**Autonomia de controle e inspeção** – Estratégias apropriadas que descrevem as atividades de controle e inspeção, e a forma como elas ocorrem em uma determinada situação. A especificação contém regras padrão que poderão ser ampliadas de acordo com a situação.

**Integração da qualificação** – é feita através da atribuição de certas tarefas para trabalhadores com uma qualificação específica. Pode ser feita através da definição de regras.

Para modelar trabalhadores em um sistema de fluxo de materiais, alguns componentes adicionais serão necessários, além da própria entidade trabalhador:

- A duração e a quantidade dos turnos de trabalho;
- A descrição das instalações bem como da disposição dos recursos e da estratégia de fluxo dos materiais.

O trabalho desenvolvido utilizou um gerenciador centralizado de entidades trabalhador. As entidades trabalhador, por sua vez, foram modeladas como elementos passivos, o que, segundo os autores, facilitou a implementação. Cada trabalhador é representado por uma estrutura com uma extensa série de atributos que define seu comportamento. Alguns destes atributos podem ser vistos na figura 11. Além destes, poderão ser criados outros, descrevendo o nível de estresse relacionado a fatores físicos ou psicológicos, a exposição à situações de perigo ou a criação de valor por parte do trabalhador.



**Figura 11: Atributos e Variáveis do Componente “Trabalhador”**  
(FREUNDEMBERG E HERPER, 1998, p. 953).

A gerência do tempo do trabalhador permite fazer distinção entre horas de trabalho em máquina e horas de trabalho humano, necessário para a computação de fatores específicos do trabalhador como níveis de estresse. Se necessário, cada trabalhador pode ter um modelo de alocação de tempo específico. Poderá haver uma interação do modelo de tempo com o modelo correspondente de um trabalhador específico, o que permite, por exemplo, a alocação de períodos de descanso de acordo com o estado atual do trabalhador, como mostra a figura 12.



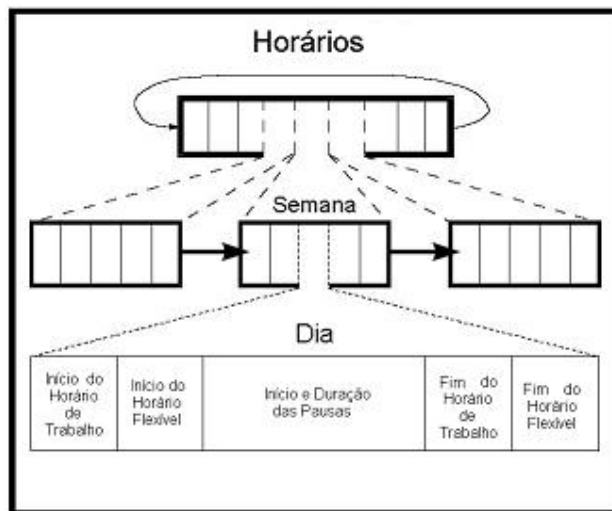


Figura 12: Estrutura do Modelo de Alocação de Tempo (FREUNDEMBERG E HERPER, 1998, p. 953).

Este modelo centralizado de gerência dos trabalhadores não ocorre em sistemas flexíveis de trabalho, no entanto, aqui ela é utilizada para facilitar a modelagem e a programação do sistema, uma vez que toda a informação necessária para a tomada de decisão encontra-se em um único local.

Os conceitos descritos foram utilizados para modelar uma linha de montagem de sistemas de transmissão. O modelo foi implementado utilizando o pacote de simulação WITNESS e a linguagem de programação GPSS/H. Antes de modelar o sistema, foram tomadas várias medidas analíticas com base no funcionamento da linha de montagem. Por meio de entrevistas com os trabalhadores, foram colhidas informações sobre a qualificação dos mesmos e qual o impacto do nível de qualificação sobre as tarefas que necessitavam ser realizadas.

Diferentes estratégias de grupos flexíveis de trabalho foram analisadas e testadas utilizando o modelo de simulação desenvolvido. Em uma delas, os trabalhadores eram incumbidos de uma única tarefa, em um determinado posto de trabalho. Quando este ficava livre, por falta de material, podia dar suporte a outros trabalhadores em outros postos de trabalho. Em uma segunda abordagem, um trabalhador realizava todas as tarefas relacionadas com a fabricação de um determinado item, acompanhando-o em todos os postos de trabalho. Neste caso, a liberdade de decisão do grupo consistia na determinação da ordem de execução das tarefas e na atribuição dos itens aos trabalhadores.

Como resultado, os autores consideraram que a definição de uma entidade trabalhador é útil em sistemas com altos índices de operações manuais. Isto pode ser obtido em vários níveis de detalhe, dependendo dos objetivos da simulação e das empresas. Uma definição absolutamente genérica de um elemento trabalhador, capaz de atender a qualquer necessidade em qualquer empresa, foi considerada impossível de realizar.

Normalmente, observam-se na literatura dois tipos de fatores que influenciam a performance humana: fatores de alto nível e fatores de baixo nível (BAINES *et al.*, 2003). Fatores de alto nível tratam de interações complexas de mecanismos psicológicos, como por exemplo, satisfação no trabalho. Tais fatores são influenciados por fatores ambientais e psicológicos, inerentemente complexos, específicos de determinado contexto e variam altamente de indivíduo para indivíduo, impossibilitando sua consideração nos modelos de simulação de manufatura. Por outro lado, fatores de baixo nível representam mecanismos psicológicos basais, como por exemplo, a desidratação. É possível criar um modelo que permite estimar alterações na performance baseado nos níveis de desidratação, e que podem ser aplicados a qualquer indivíduo. Diferentemente dos modelos de alto nível, estes modelos podem ser facilmente simulados. O próximo estudo descreve como dois destes fatores, a alteração da performance devido a idade e aos ciclos circadianos, podem ser incluídos nos modelos de simulação e qual o impacto destes sobre os modelos de simulação.

## 5.7 SIMULANDO FATORES DE BAIXO NÍVEL

Este trabalho, realizado pela *Cranfield University* em colaboração com a *Ford Motor Company*, foi realizado a partir da constatação de que os modelos de simulação normalmente apresentavam resultados de performance maiores do que os que realmente eram observados nos sistemas reais. As linhas de montagem da empresa, onde uma grande parte do trabalho é função do trabalho humano, tinham modelos de simulação desenvolvidos a partir da ferramenta de simulação WITNESS. Os autores constataram que a ferramenta disponível era capaz de modelar muito bem os elementos tecnológicos da linha de montagem. Em contrapartida, o elemento humano, era tratado como pseudo-

tecnológico, e esperava-se que este tivesse um comportamento semelhante a uma máquina.

O objetivo do trabalho foi o de investigar a possibilidade de incluir fatores humanos bem conhecidos, que influenciam na performance humana, nos modelos já existentes, verificando o impacto dos mesmos. Os fatores escolhidos foram: a alteração de performance relacionada com a idade dos trabalhadores, e a alteração de performance relacionada aos ciclos circadianos.

### 5.7.1 Alterações de performance relacionadas à idade

Existem evidências de que a performance decresce com o aumento da idade. Às capacidades físicas e cognitivas tem um decréscimo de aproximadamente 1% ao ano a partir dos 20 anos de idade (SALTHOUSE<sup>10</sup>, 2000 apud BAINES *et al.*, 2003). Até 20 anos, o corpo humano ainda está se desenvolvendo e a performance aumenta até atingir o máximo nesta idade, com pequenas variações de indivíduo para indivíduo. Funções cognitivas básicas, como a memória recente, velocidade de raciocínio e tomada de decisões, bem como faculdades físicas como exercícios aeróbicos, aproveitamento do oxigênio e a força muscular máxima decrescem de forma linear quando consideradas isoladamente. Esta diminuição é influenciada e pode ter seus efeitos reduzidos de forma significativa, pelo aumento de fatores tecnológicos, interações interpessoais, experiência, exercício físico, treinamento, estilo de vida e o desenvolvimento de mecanismos individuais de compensação. Segundo Warr<sup>11</sup> (1995 apud BAINES *et al.*, 2003), estes efeitos mascaram o decréscimo da performance em função da idade.

Foi desenvolvido um modelo baseado na premissa de que as tarefas atribuídas a um trabalhador são significativamente menores que o máximo da performance que este pode alcançar. O modelo assume que a diminuição não pode ser percebida antes da idade de 30 anos, e que, a partir daí, decresce até a idade de 65 anos. Foi assumido que a razão do decremento de performance devido a idade ( $d$ ) não é uma constante de 1% ao ano,

---

<sup>10</sup> Salthouse, T.A. [2000], Aging and measures of processing speed, *Biological Psychology*. 35 – 54.

<sup>11</sup> Warr P. Age and job performance, in: *Work and Aging: A European Perspective*, Taylor & Francis, 1995.

mas que incrementa linearmente de 0%, aos 30 anos, até 1% aos 65 anos. Daí pode-se deprender que, dos 30 aos 65 anos,  $d$  pode ser calculado por:

$$d = \frac{(a - 30)}{35}$$

onde  $d$  = razão de decréscimo de performance devido a idade (%);  $a$  = idade em anos.

A diminuição da performance em uma dada idade  $a$  pode então ser calculada por:

$$D = d(a - 30)$$

Esta equação fornece um percentual de decréscimo da performance em relação à idade, que pode ser facilmente inserida em um modelo de simulação, aumentando o tempo necessário para a realização de uma dada tarefa. Os efeitos deste modelo podem ser vistos na figura 13.

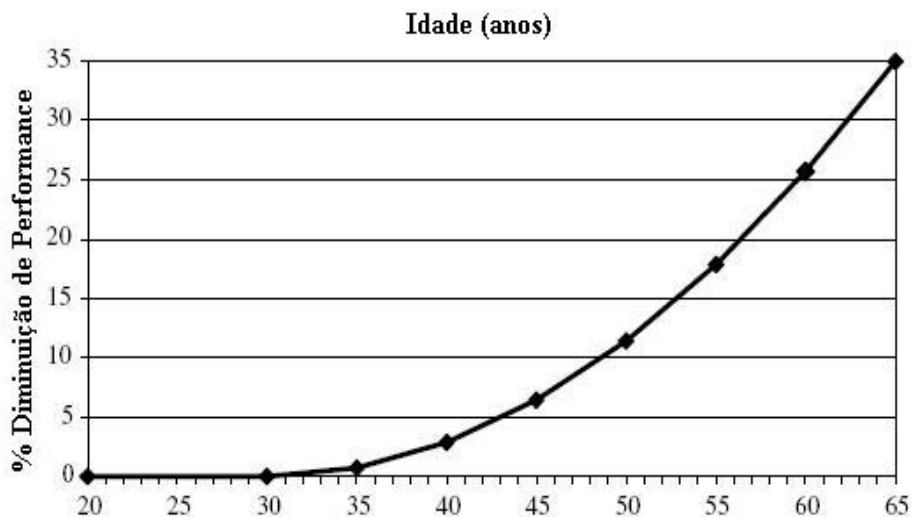


Figura 13: Diminuição da Performance em Função da Idade (BAINES *et al.*, 2003, p. 6)

### 5.7.2 Alterações de performance relacionadas aos ciclos circadianos

Muitos dos processos relacionados às atividades do corpo humano, desde os de caráter mais basal como a produção de hormônios, a digestão e a homeostase, até os de alto nível como cognição ou locomoção, exibem variações durante o tempo (MONK E LANG, 1982). Alguns, como os ritmos circadianos, variam de forma relativamente simples durante um período de 24 horas. Outros, mais complexos, tem seu período de variação durante semanas, meses ou anos. A manutenção destes ritmos são vitais na bio-regulação, sendo responsáveis pela manutenção dos níveis normais de esforço, motivação e saúde física e mental. Quando estes ciclos são interrompidos, a performance das atividades em geral será degradada e a saúde poderá ser afetada de tal forma, a ponto de poder causar doenças agudas ou crônicas, como problemas cardiovasculares, câncer e depressão (MARQUIE E FORET, 1999; RUTENFRANZ<sup>12</sup> *et al.*, 1977 apud BAINES *et al.*, 2003).

A função principal dos ciclos circadianos é a preparação do corpo para o sono, através da regulação hormonal das funções corporais mais básicas. Em um certo momento do dia, normalmente entre 22:30 h e 1:00 h, o corpo humano naturalmente entra no sono. Isto é normalmente acompanhado pela redução da temperatura corporal, um aumento da melatonina (o hormônio do sono) e uma atividade cerebral típica. Os ciclos circadianos fazem, então, que o corpo desperte, depois de um período médio de sete horas de sono. No entanto, a hora do início do sono, bem como o tempo médio necessário para o descanso variam de pessoa para pessoa. Apesar de a existência dos ciclos circadianos ser confirmada e relativamente fácil de mensurar, seu impacto na performance humana é difícil de ser medida (BAINES *et al.*, 2003).

Neste trabalho, Baines *et al* (2003) desenvolveram um estudo de simulação de produção que incorpora a questão do biorritmo, utilizando um modelo proposto por Spencer (1987). Spencer desenvolveu um estudo envolvendo 30 estudantes por um período de nove dias com períodos irregulares de trabalho e descanso. Baseado nos resultados obtidos e em trabalhos anteriores foi desenvolvido um modelo que incorpora hora do dia e tempo acordado, capaz de descrever as alterações de performance em atividades desenvolvidas ao longo de um dia. Um resultado típico de um trabalhador que acorda três horas antes de cada turno é mostrado na figura 14.

---

<sup>12</sup> Rutenfranz, J., Colquhoun, W. P., Knauth, P., Ghata, J.N., Biomedical and psychological aspects of shift work: a review, *Scandinavian Journal of Work Environment and Health* 3 (1977) 165-182.

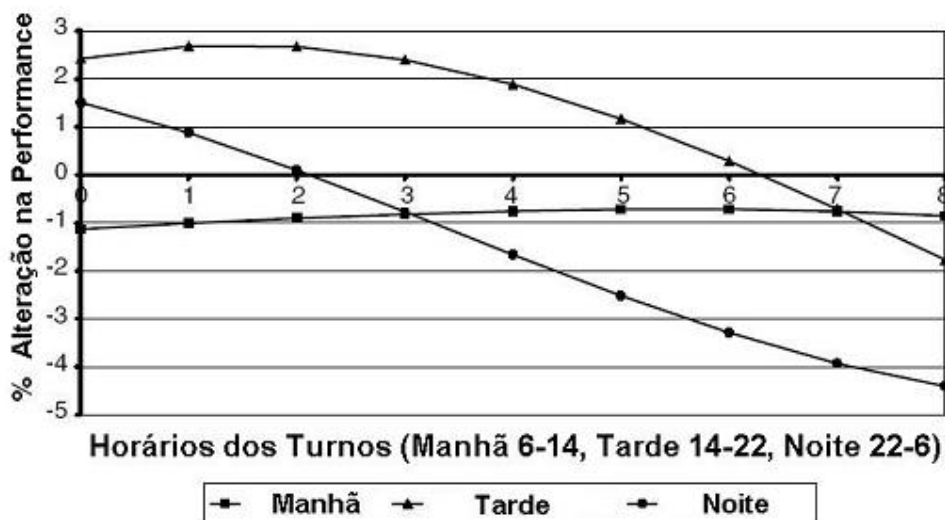


Figura 14: Modelo de ciclo circadiano conforme Spencer (1987, p. 7):  
trabalho inicia três horas após despertar

Como resultado do estudo de Baines, pode ser observado que os ciclos circadianos produziram uma pequena alteração no desempenho do sistema, em torno de 2%. Sua conclusão foi de que modelos cíclicos, com valor médio em torno de zero, como é o caso dos ciclos circadianos no modelo de Spencer, não são capazes de influenciar significativamente os resultados dos modelos de simulação, ressaltando, no entanto, que são necessários outros experimentos no sentido de confirmar estes resultados.

Spencer (1987) desenvolveu seu estudo com o objetivo de verificar a influência dos ciclos circadianos em atividades relacionadas ao controle de tráfego aéreo e à operação e pilotagem de aeronaves. Para isto, utilizou-se de testes com um enfoque estritamente cognitivo, como o DSST (*Digital Symbol Substitution Task*), que consiste na identificação de padrões gráficos. Neste teste, é apresentado a um voluntário uma série de fichas como as da figura 15, que deverá preencher a matriz de pontos que se encontra no centro da ficha, com o padrão gráfico da matriz de pontos correspondente, encontrada no topo da ficha.

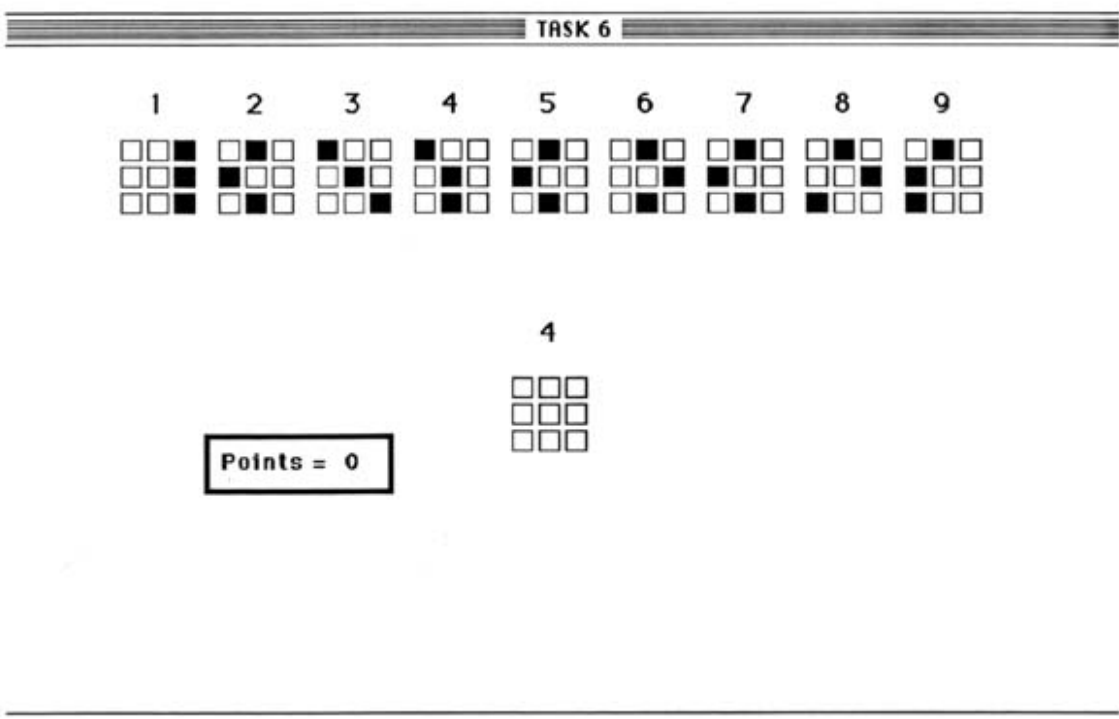


Figura 15: Teste DSST – *Digital Symbol Substitution Task*  
(Fonte: <http://lsda.jsc.nasa.gov/dil/image/msci863.jpg>)

Outros autores, como Parker e Oglesby (1972), e Monk e Leng (1982), concentraram seus estudos em atividades físicas e sugerem alterações mais acentuadas da performance relacionadas a estes ciclos. Em função disto foi desenvolvido um estudo de simulação, detalhado no próximo capítulo, que incorpora um modelo aproximado das variações de performance devido aos ciclos circadianos, a fim de verificar se estes são capazes de exercer uma influência significativa nos resultados da simulação. Uma vez percebida sua relevância nos resultados da simulação, estudos posteriores poderão ser realizados com o objetivo de determinar a forma mais apropriada destas curvas.

## 6. DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA: INCORPORANDO CICLOS CIRCADIANOS EM MODELOS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo trata do estudo da incorporação de fatores humanos em softwares de simulação de produção. Trata do desenvolvimento de técnica a partir do software Promodel. Como parâmetros humanos foram consideradas a fadiga e o ciclo circadiano.

A fadiga resultante do esforço físico relacionado ao trabalho executado em sistemas de produção, além de outros fatores não relacionados às demandas de energia pelo corpo humano, afetam a produtividade, obrigando que os períodos de trabalho sejam intercalados por períodos de descanso, permitindo ao corpo humano se recuperar (PARKER E OGLESBY, 1972). Segundo Parker e Oglesby (1972), a produtividade de um ser humano, em atividades industriais, varia ao longo do dia segundo a curva indicada na figura 16.

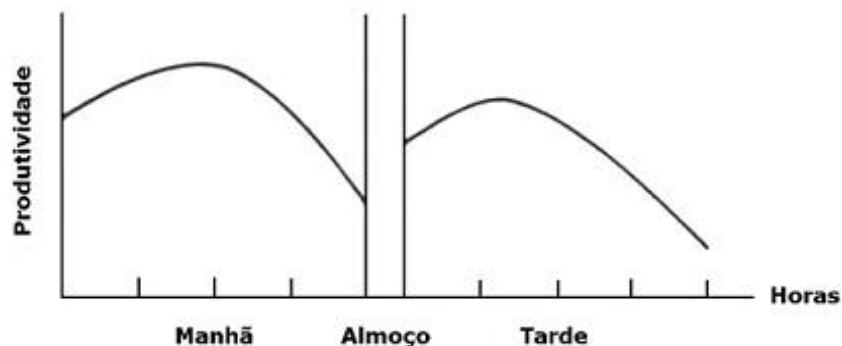


Figura 16: Alterações da produtividade ao longo de um dia (PARKER E OGLESBY, 1972, p.253)

Conforme pode ser visto pela figura, o ritmo do trabalho é menor no início do turno, elevando-se até um pico, e então caindo novamente até o fim do período. Além disto, a produtividade durante o período da manhã é ligeiramente superior ao período da tarde. A



menor produtividade no início dos turnos pode estar relacionada com o estabelecimento do ritmo de trabalho, enquanto a queda no final dos períodos pode estar relacionada à fadiga pelo trabalho. Se a atividade necessita um maior esforço físico, o formato da curva permanece o mesmo, apresentando, no entanto, maiores variações (PARKER E OGLESBY, 1972).

Em algumas situações, no entanto, o ritmo do trabalho é determinado pela atividade de máquinas ou equipamentos industriais. Nestes casos, a produtividade não terá as variações apresentadas pelas curvas da figura 16. No entanto, o conhecimento destas curvas deverá levar ao estabelecimento de um ritmo de trabalho que respeite o ser humano, uma vez que a quebra neste ritmo poderá levar a um aumento de não conformidades e acidentes de trabalho, ou ao desenvolvimento de doenças crônicas e degenerativas (MARQUIE E FORET, 1999; RUTENFRANZ *et al.*, 1977 apud BAINES *et al.*, 2003).

Além das variações da produtividade que ocorrem durante o período de um dia, há também uma variação semanal, conforme pode ser visto na figura 17.

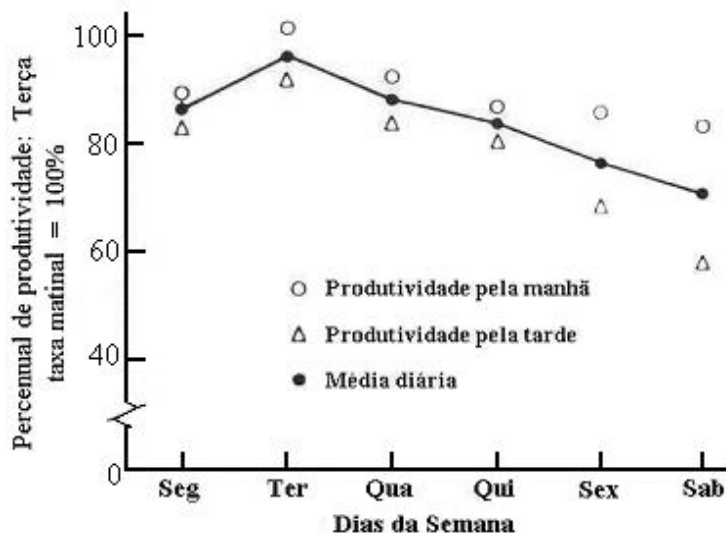


Figura 17: Variações da performance ao longo de uma semana (PARKER E OGLESBY, 1972, p.254)

Como se pode observar, a maior produtividade está na terça feira e esta vai decaindo até alcançar um mínimo no sábado pela tarde. Algumas tentativas foram feitas no sentido de substituir o sistema tradicional de cinco dias semanais de oito horas de trabalho por

quatro dias de 10 horas, não havendo, no entanto, uma melhora nos níveis de produtividade (PARKER E OGLESBY, 1972).

Além das curvas já citadas, outros fatores também poderiam ser considerados, como por exemplo, o rendimento do trabalho sob condições adversas de temperatura ou ruído ambiental (conforme o estudo descrito no item 5.4), as técnicas para modelamento da carga de trabalho humano definidos por Keller (2002), ou ainda implementar o modelo simplificado do processador humano proposto por Card, Moran e Newel (1986).

A partir destes estudos, parece lógico pensar que a abordagem tradicional utilizada em sistemas de simulação, onde o trabalhador é representado como um recurso, não é suficiente para dar acurácia ao sistema simulado. Neste sentido, foi desenvolvido um estudo de simulação, onde a variação da produtividade de um a três trabalhadores durante o período de um dia foi considerada, a fim de verificar a influência desta variável sobre a produtividade geral do sistema. Como a proposta é somente avaliar se há ou não um impacto dos fatores humanos no resultado da simulação, foram consideradas apenas as variações relacionadas aos ciclos circadianos, apesar da existência de muitos outros fatores, inclusive os já modelados e identificados no parágrafo anterior.

## 6.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SIMULADO

O objetivo do trabalho é a verificação da influência das variações de performance do ser humano, devido aos ciclos circadianos sobre um sistema de simulação. Para que isto possa ser obtido, é importante que se tenha um sistema de simulação que já tenha sido validado, onde se possa inserir as variações devidas aos ciclos circadianos.

O software escolhido para efetuar a simulação foi o ProModel, que é um dos mais importantes sistemas de simulação de manufatura, sendo utilizado na indústria farmacêutica, sistemas de saúde e sistemas de manufatura. Atualmente, o ProModel é utilizado por mais de 4.000 usuários, além de ser utilizado por 43 das 100 maiores empresas no *ranking* da *Fortune Magazine*, incluindo *Pfizer*, *Johnson & Johnson*, *Ford*, *UPS* e *General Motors* (Promodel, 2004).

O modelo de simulação escolhido é um dos modelos fornecidos pelo ProModel como demonstração, intitulado “Mfg\_cost.mod”. Trata-se da simulação de uma oficina de usinagem e montagem de engrenagens, que pode ser operada por um, dois ou três funcionários. Através do modelo, um analista pode observar o impacto do emprego do número de trabalhadores sobre as taxas de produção, bem como sobre o custo unitário das peças, quando se varia o número de funcionários. O custo unitário é calculado em função do custo homem/hora e do custo hora da máquina.

A oficina consiste de dois tornos mecânicos (NC Lathe1 e NC Lathe2), uma bancada onde as peças são desengraxadas, e um local onde é feita a inspeção das peças fabricadas. O modelo de simulação pode ser observado na figura 18.

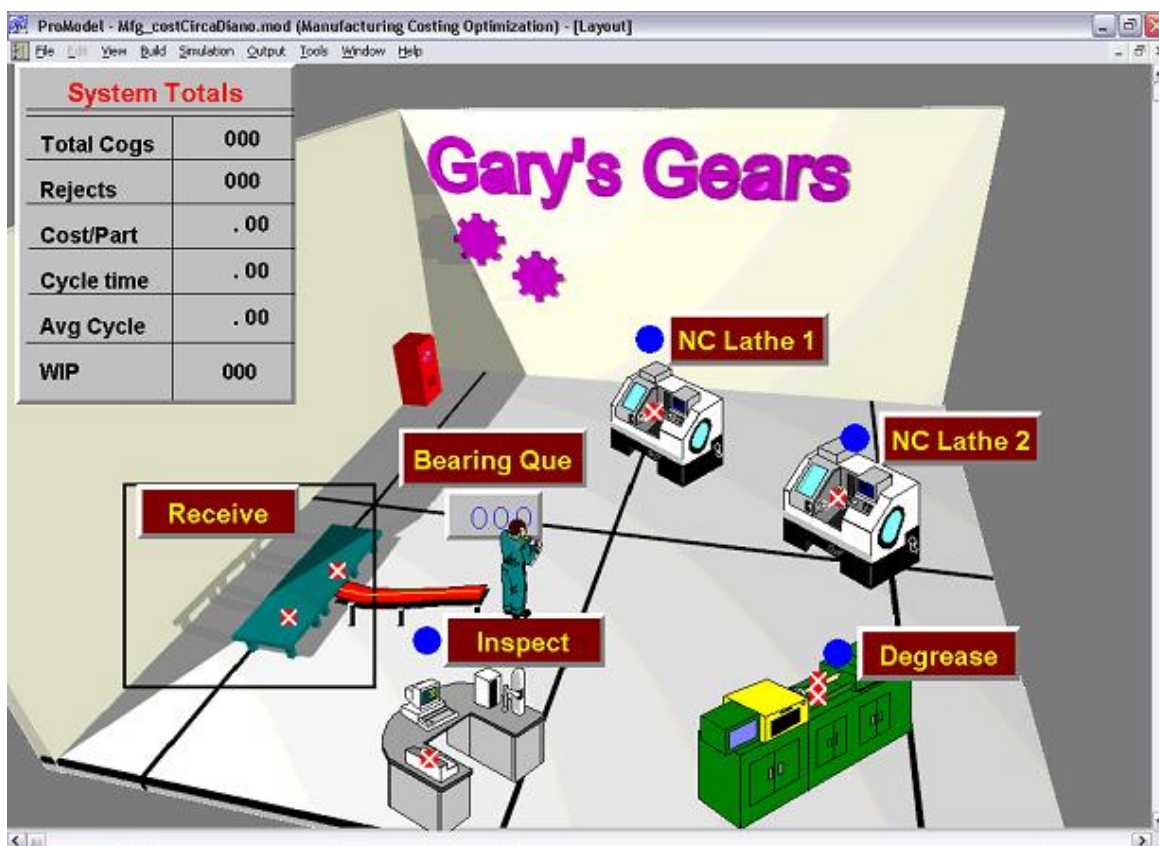


Figura 18: Modelo de simulação Mfg\_cost.mod fornecido pelo software ProModel

Quando a matéria prima chega no local da recepção, é apanhada pelo operador e levada até um dos tornos mecânicos. O operador faz, então, a colocação da matéria prima no

torno e faz a programação do mesmo. O tempo necessário para esta operação varia de acordo com uma curva normal com média de 3 min, e desvio padrão de 0,2 min. A próxima operação do funcionário dependerá do estado atual do sistema, podendo ser um dos seguintes:

- a) Um dos tornos está livre, e será carregado com um novo item;
- b) Um dos tornos terminou a operação. A peça processada, uma roda dentada, é então retirada do torno e deixada sobre a bancada para que seja desengraxada, possivelmente dentro de um solvente;
- c) Ambos os tornos estão em funcionamento e existe uma peça já desengraxada sobre a bancada. Esta peça será então inspecionada e, caso esteja de acordo com as especificações, será montada com uma engrenagem.

A operação de inspeção tem uma duração que varia também de acordo com uma curva normal, com média de 3.2 min e desvio padrão de 0,3min. Caso a peça esteja dentro das especificações, será então montada a um rolamento, operação esta que leva um tempo médio de 1,5 min e desvio padrão 0,2 min. Portanto, as peças boas demandam um tempo maior do operador. O tempo médio que o operador dispende em uma peça boa é de 7,7 min, contra 6,2 minutos de operação em uma peça defeituosa.

A quantidade de peças defeituosas, neste modelo de simulação, é fixada em 30% das peças produzidas, mas este percentual pode ser facilmente alterado para mais ou para menos. Quando se diminui o percentual de peças defeituosas para menos de 30%, a quantidade total de peças processadas em determinado tempo, entre boas e ruins, diminui, uma vez que o tempo para processar cada peça boa é maior que o tempo para processar uma peça ruim. Através da simulação, pode-se observar que o tempo médio de processamento das peças, tanto boas quanto ruins, é de 34 minutos. Deste tempo, 7,25 minutos em média correspondem às operações realizadas pelo funcionário. Portanto, em torno de 21% do tempo de operação corresponde ao trabalho do operador.

Outro parâmetro neste modelo é a quantidade de operadores que podem ser empregados nesta célula de trabalho. O modelo permite que se selecione a utilização de um, dois ou três funcionários, a fim de que se possa medir o impacto destes, sobre as quantidades de produção e os custos resultantes.

Pode-se observar que o modelo permite a visualização, na própria tela da simulação, do total de peças boas e ruins produzidas, do custo unitário, do tempo total e do tempo médio de produção das peças, e da quantidade de peças em produção. Outros dados, como percentual de utilização de cada recurso, tempos de utilização e deslocamento, entre outros, podem ser visualizados através de um relatório adicional, exibido no final da simulação. A figura 19 é uma amostra da simulação, no tempo 5h e 31 min, onde se selecionou três operadores, podendo ser vistos os resultados intermediários. O relatório com os demais dados desta simulação podem ser visualizados no apêndice A.

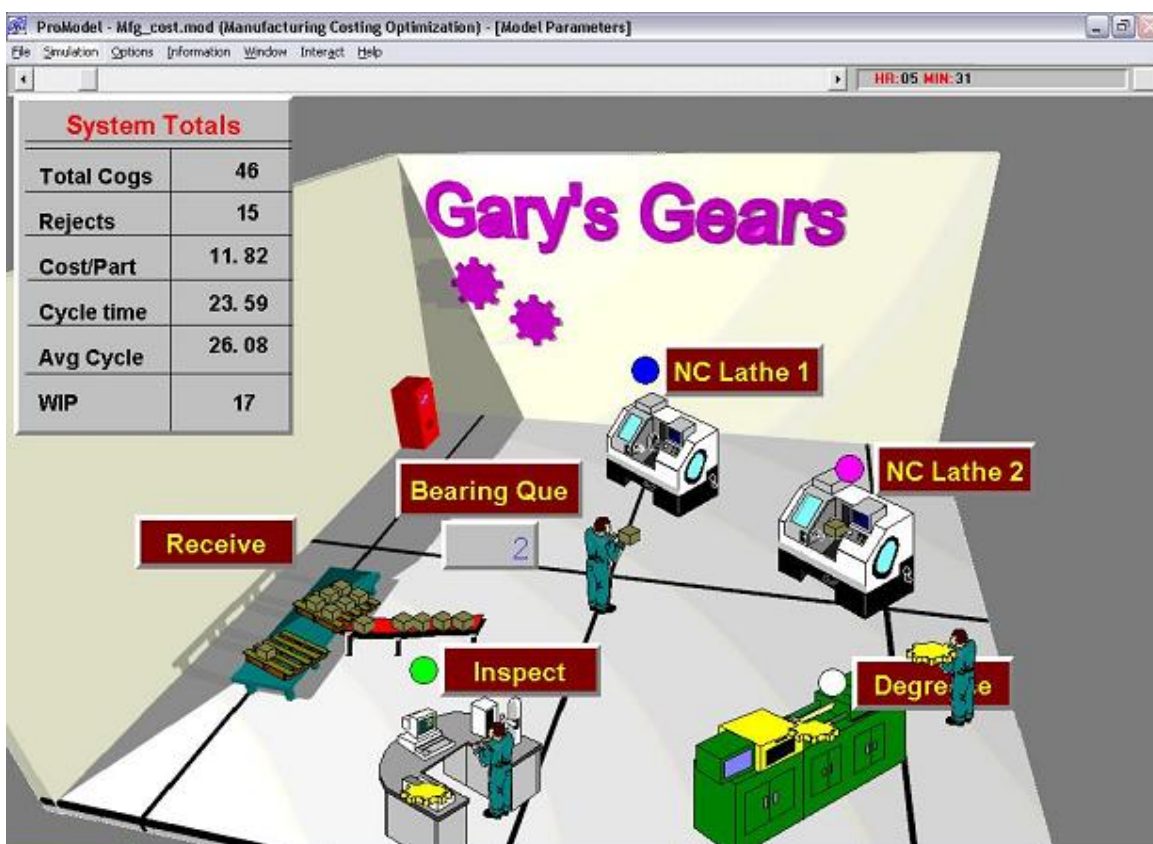


Figura 19: Amostra do model Mfg\_cost.mod fornecido pelo software ProModel em operação no tempo  $t = 5h31min$ .

O modelo, da forma como foi programado, simula 15 horas contínuas de operação. Este tempo pode, no entanto, ser alterado facilmente, permitindo a simulação de dias, semanas, meses ou anos de produção. No entanto, nestes casos, os resultados poderão ser inválidos, uma vez que nenhum operador humano real seria capaz de trabalhar em tais condições por mais de oito horas seguidas. As variáveis da simulação, portanto, necessitam ser ajustadas com base em um modelo real, a fim de incorporar variações de

performance, paradas para descanso, trocas de turnos, etc. Presume-se que o volume de ajustes necessários poderia ser reduzido significativamente, se fatores humanos estivessem automaticamente incorporados no comportamento dos operadores. Para fazer esta verificação, incorporou-se as variações de performance devido aos ciclos circadianos no modelo exposto, para que se possa comparar os resultados da simulação com e sem os mesmos.

## 6.2 INCORPORANDO VARIAÇÕES DE PERFORMANCE DEVIDO AOS CICLOS CIRCADIANOS

Como o modelo original executa a simulação durante um número específico de horas, sem considerar turnos diários, o modelo foi primeiramente alterado, introduzindo-se um horário de trabalho de cinco dias por semana, com uma jornada de oito horas diárias, com dois turnos de quatro horas separados por uma hora de intervalo.

A variação da performance durante um dia de trabalho, devido aos ciclos circadianos, na visão de Parker e Oglesby (1972), pode ser vista na figura 16. O gráfico não especifica a amplitude desta variação, mas somente a forma como esta variação se dá. Os autores mencionam, no entanto, que a variação é maior quanto maior é o esforço físico empregado pelo trabalhador.

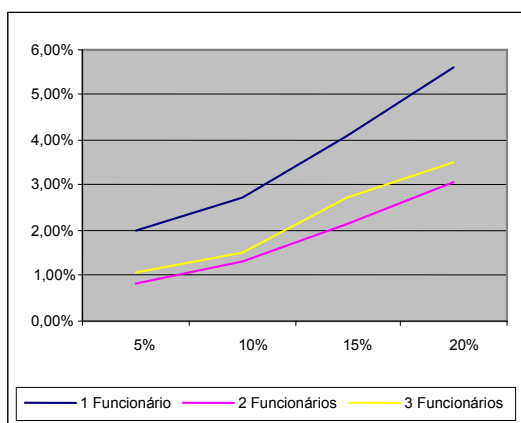
No modelo exposto, a interação dos trabalhadores sobre as peças fabricadas dá-se em três momentos: no momento da colocação da peça no torno, na retirada da peça processada do torno e na inspeção e possível montagem da peça considerada boa. Como já foi visto, a colocação da peça no torno exige, do operador, um tempo médio de três minutos, enquanto que a inspeção exige um tempo médio de 3.2 minutos. As peças boas necessitam ainda um tempo médio de 1.5 min para sua montagem. Considerou-se que a variação da performance dos operadores tem relação direta com o tempo dispendido nestas tarefas e, portanto, o modelo foi alterado para que o tempo necessário para a realização das tarefas varie ao longo do dia, de acordo com a curva apresentada na figura 15. Como Parker e Oglesby não determinam a amplitude da variação da produtividade

durante o dia, várias simulações foram realizadas, variando-se esta amplitude de mais ou menos 5% em relação à média, até mais ou menos 20% em relação à média.

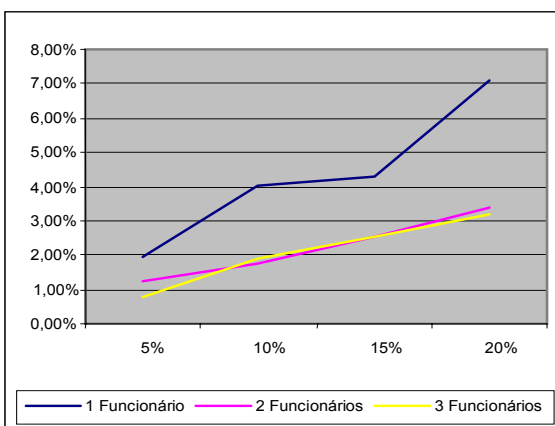
Uma segunda variável adicionada à simulação foi o percentual de peças boas com relação às ruins, em função de que o tempo de processamento da peça boa ser maior do que o tempo de processamento da peça ruim, e de esta diferença ser relacionada diretamente ao trabalho dos operadores.

Os resultados obtidos foram comparados com aqueles obtidos sem a variação devida aos ciclos circadianos, e podem ser vistos através dos gráficos apresentados nas figura 20a, 20b, 20d e 20e. Neles, pode-se observar a variação das quantidades de peças obtidas, comparando-se com o modelo original, onde os ciclos circadianos não são considerados. Os valores no eixo y representam a variação percentual da produção, enquanto que o eixo x representa a variação da amplitude do efeito dos ciclos circadianos. Cada um dos gráficos representa a diferença da produção, considerando um percentual específico de peças boas produzidas.

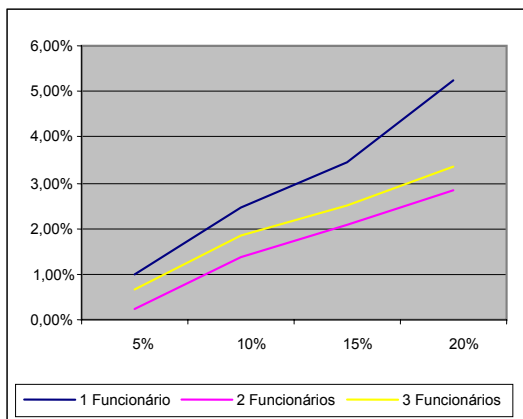
Como se pode observar, quanto maior for à amplitude do efeito circadiano sobre a performance dos trabalhadores, maiores serão as taxas de produção. No modelo simulado, estas variações influenciaram em até 7% no total de peças produzidas, o que é um resultado importante, considerando-se que apenas 20% do trabalho efetuado sobre a peça é efetuada pelos operadores, portanto, sujeito aos efeitos dos ciclos circadianos.



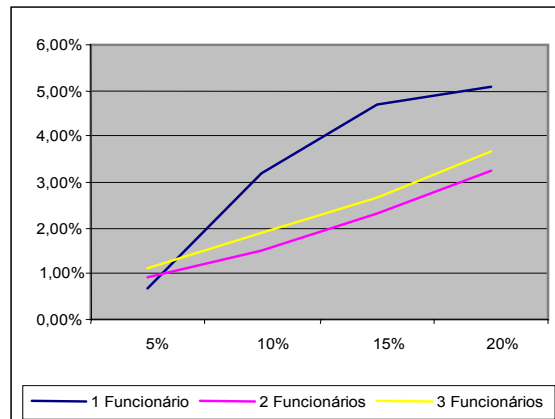
**Figura 20a: 70% de peças boas;**



**Figura 20b: 80% de peças boas;**

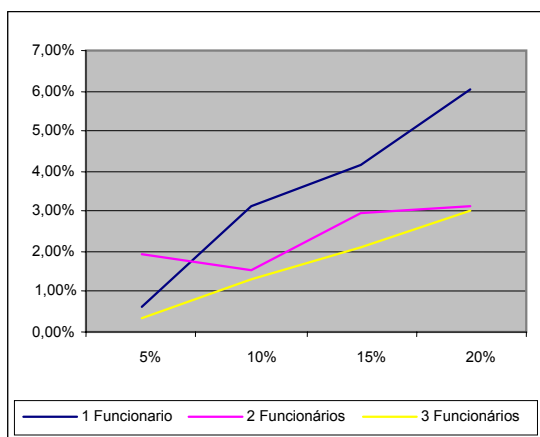


**Figura 20c: 90% de peças boas;**

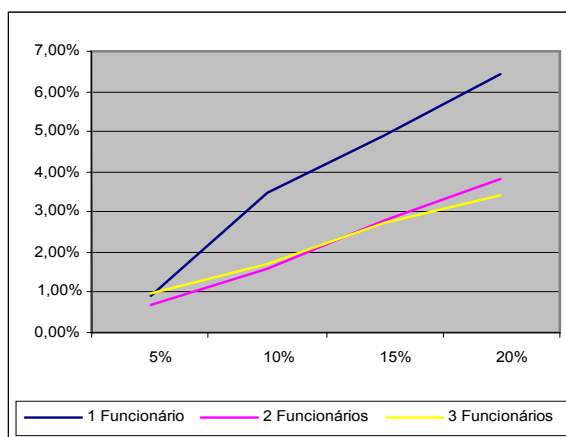


**Figura 20d: 100% de peças boas;**

Uma segunda simulação foi efetuada, incorporando-se períodos de 5 min de descanso a cada hora, para cada um dos operadores. Foi feita a suposição de que no final de cada período de descanso, houve uma recuperação da performance, da ordem de 10%. Os resultados obtidos podem ser visualizados nos gráficos da figura 21a até 21d.

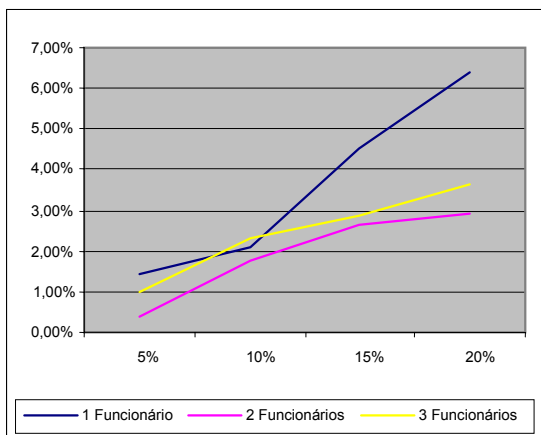


**Figura 21a: 70% de peças boas;**

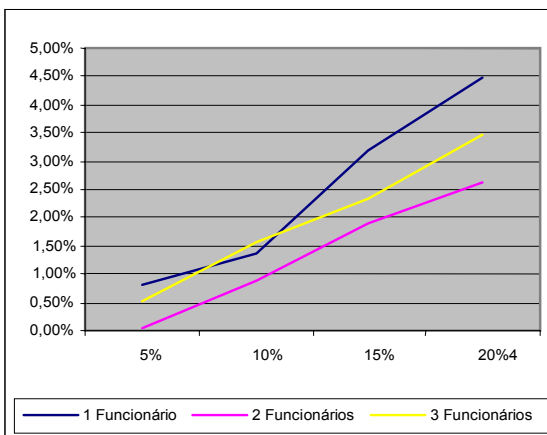


**Figura 21b: 80% de peças boas;**





**Figura 21c: 90% de peças boas;**



**Figura 21d: 100% de peças boas;**

Como se pode observar, o impacto da inclusão do período de descanso no modelo de simulação foi de menos de 1%, como pode ser visto, por exemplo, comparando-se a figura 20a com a figura 21a, onde a curva da produtividade relacionada a um funcionário variou de 5,5% para 6%. Resultados similares poderão ser observados comparando-se os resultados exibidos nas demais figuras.

Dos resultados, pode-se ver que a inclusão das variações de produtividade em função dos ciclos circadianos, neste modelo de simulação, resultou em uma alteração na taxa de produtividade do sistema em até sete por cento. Como neste modelo, o percentual do trabalho humano sobre as peças produzidas corresponde a vinte por cento, pode-se esperar um impacto muito mais dramático nas situações onde este percentual é maior.

Neste trabalho, foi considerado, no modelo de simulação, somente o impacto relativo ao ciclo circadiano. Porém, há outros fatores que necessitam também ser considerados, como as variações da produtividade ao longo de uma semana de trabalho (figura 17), variações relacionadas à curva de aprendizagem, variações relacionadas a fatores ambientais (figura 6), da qualificação dos operadores, da carga de trabalho físico, ou ainda outros. Cada um destes poderá incidir, em maior ou menor grau, sobre um determinado funcionário em um determinado posto de trabalho. Se considerados em conjunto, poderão levar a uma resultante capaz de influenciar drasticamente nos resultados de um sistema de produção, e, portanto, na simulação deste sistema. Como foi descrito no item 3.1, o planejamento de experiências de simulação é feito em várias etapas (NAYLOR, 1971). Depois da formulação do problema, coleta e

processamento de dados reais, formulação de um modelo matemático e da estimativa de parâmetros, chega-se à avaliação do modelo. Nesta etapa do processo, os eventuais “pontos fracos” do sistema poderão ser detectados e corrigidos. Um modelo mais consistente de simulação, capaz de reproduzir com maior exatidão o comportamento de um trabalhador, resultará em experimentos que necessitarão, possivelmente, menos ajustes nesta etapa, resultando em sistemas de simulação mais precisos e confiáveis.

Portanto, dada a maior complexidade e flexibilidade de um trabalhador humano em comparação a uma máquina ou equipamento, parece ser interessante, que os sistemas de simulação desenvolvam um modelo específico para a simulação de trabalhadores humanos, em contraste com a abordagem atual, onde o trabalhador é modelado como um recurso. Além disto, é importante que estes modelos permitam a individualização dos trabalhadores, visto que estes terão características singulares, podendo apresentar diferentes graus de aprendizagem, capacitação ou resposta a estímulos externos, como são os fatores ambientais.

Para a determinação mais precisa do comportamento de um ser humano, serão necessários experimentos objetivando determinar, de forma mais exata, a influência não só dos ciclos circadianos, mas de cada um dos fatores anteriormente citados. Além disto é necessário o desenvolvimento de rotinas de computador, capazes de representar este comportamento, de forma parametrizada e individualizada.

Como resultado, este esforço resultará em sistemas de simulação mais capazes de representar os sistemas reais, com resultados mais precisos, e menos necessidade de revisão e ajustes no modelo. Como benefício adicional, o próprio software de simulação poderá auxiliar o projetista industrial, que não é necessariamente especialista em ergonomia, a projetar postos de trabalho ergonômicamente mais ajustados, onde o trabalhador tenha uma maior qualidade para exercer seu trabalho, indicando condições adversas e, principalmente, condições que potencializam a capacidade de trabalho do ser humano.

As questões ergonômicas são normalmente tratadas por sistemas de simulação com enfoque em questões biomecânicas, e que abordam as questões relativas à produtividade com relação a um posto de trabalho específico. A produtividade de toda uma planta de

produção, com as interações entre os diversos postos de trabalho, filas de recebimento de matérias primas, filas de expedição de produtos acabados, entre outros, são tratados por sistemas de software que enfocam somente as questões da produção. A introdução dos fatores ergonômicos nos sistemas de produção aproximaria estas duas áreas de estudo, melhorando a simulação dos sistemas de manufatura.

## 7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação avaliou como os fatores humanos, tais como fadiga, idade, alterações de produtividade relacionadas aos ciclos circadianos, capacitação e organização do trabalho, são considerados em sistemas de simulação, demonstrando que estes são capazes de alterar significativamente os resultados em simulações de sistemas de manufatura, não sendo, no entanto, considerados de forma apropriada nestes sistemas. Foram introduzidas as variações relativas às alterações de performance do ser humano relacionadas aos ciclos circadianos em um sistema de simulação fornecido como demonstração do software Pro-Model, através do qual pode-se observar que houve um aumento da capacidade de produção do sistema, mesmo considerando unicamente o efeito do ciclo circadiano. A introdução das demais variáveis relacionadas aos fatores humanos poderá, portanto, resultar em variações ainda maiores, evidenciando que a abordagem tradicional nos sistemas de simulação, onde o ser humano é modelado como um recurso, da mesma maneira que uma máquina ou uma ferramenta, é insuficiente para representar toda a complexidade da interação do ser humano nestes sistemas. Especialmente se estes empregam um alto percentual de trabalho humano, como normalmente é o caso.

O processo do planejamento e execução de experimentos de simulação, por ser executado em etapas, onde é constantemente retroalimentado com dados extraídos de sistemas reais, será especialmente beneficiado pelo emprego de rotinas computacionais mais capazes de representar o desempenho de um ser humano. A maior capacidade de representar as interações deste, com um sistema qualquer, resultará em uma menor necessidade de ajustes do modelo.

Vários experimentos de simulação incorporando fatores humanos já foram realizados com sucesso, demonstrando que esta tarefa é factível e estabelecendo a base para a criação das rotinas computacionais necessárias para efetuar a sua simulação. De fato, os experimentos realizados consideram vários aspectos da ergonomia, desde os relacionados a fatores cognitivos, até os relacionados a variáveis ambientais, como calor ou ruído.

### **Recomendações para Trabalhos Futuros**

Em face do apresentado, recomenda-se que sejam realizados estudos para a determinação de quais são os fatores ergonômicos que realmente podem influenciar no rendimento do trabalho do ser humano, e em seguida a determinação mais precisa do comportamento destes fatores. Pode-se, de antemão, sugerir que sejam investigadas as variações de performance devido aos ciclos circadianos, variações de produtividade durante uma semana de trabalho, variações durante o período de um mês de trabalho, além de outras, como as variações relacionadas a curvas de aprendizagem, a idade do trabalhador e à capacitação a uma tarefa específica, variações relacionadas à fadiga e ao tempo de trabalho sem interrupções, entre outras. Também se deveria investigar fatores de risco a saúde humana, relacionadas ao trabalho, de forma que o software de simulação possa chamar a atenção para estes fatores que, de outra forma, poderiam passar despercebidos. Esta constitui-se, por natureza, uma tarefa multidisciplinar, envolvendo áreas como ergonomia, a engenharia de produção, a medicina e a psicologia.

Paralelamente, faz-se necessário o desenvolvimento de rotinas computacionais que permitam a parametrização e a simulação de cada um destes fatores. Assim, os elementos da simulação por eventos discretos, relacionados no item 2.4, poderiam ter a adição do elemento “trabalhador” que, dotado de todas estas características, possa interagir com os demais elementos, a fim de executar uma simulação mais precisa. O objetivo não é o de mudar o foco do sistema de simulação, da produção para a ergonomia, mas enriquecer os sistemas de simulação da produção, incorporando aquele que certamente é o mais importante nestes sistemas: o ser humano.

## REFERÊNCIAS

BADLER, N., 1997. *Virtual Humans for Animation, Ergonomics, and Simulation*. Center for Human Modeling and Simulation. University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.

BAINES T., Stephen M.; SIEBERS P.O.; LADBROOK J. *Humans: the missing link in manufacturing simulation?* School of Industrial and Manufacturing Science. Cranfield University. Bedfordshire UK: Ed. Elsevier B.V., 2003.

BANKS, J. The Future of Simulation Software: A Panel Discussion. In: PROCEEDINGS OF THE 1998 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Washington, D.C.. Los Alamitos, CA: Ed. D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan eds., 1998, p.1681 - 1687.

BANKS, Jerry; CARSON, John S.; NELSON, Barry L.; NICOL, David M. *Discrete-Event System Simulation*. 3.ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

BERNHARD W., SHILLING A., 1997. Simulation of Group Work Processes in Manufacturing. In: PROCEEDING OF THE 1997 WINTER SIMULATION CONFERENCE, ano local de realização. Congresso, local de publicação: Ed. S. Andradóttir, K.J. Healy, D.H. Withers, and B.L. Nelson. Basle Institute of Technology Muttenz, Switzerland. 1997, p. 888 - 891.

BES M. O. *A Case Study of a Human Error in a Dynamic Environment*. In: Interacting with Computers, Valciennes University, Valcienes, France: Ed. Elsevier B.V., 1999. p. 525 – 543.

CASSEL, R.A.; KLIPPEL M.; ANTUNES Jr, J.A.V.; *Considerações críticas acerca da relação do Mecanismo da Função Produção e a simulação computacional – um estudo de caso*. In: XXIV Encontro Nac. De Eng. De Produção – Florianópolis, SC, Brasil, 2004. p. 458 – 465.

CARD, S.K.; MORAN, T.P.; NEWELL, A. *The model Human Processor: An engineering model of human performance 45-1-35*. In: BOFF, Kenneth R.; KAUFMAN, Lloyd; THOMAS, James P. (Ed.) *Handbook of perception and Human Performance V. II Cognitive Processes and Performance* New York: John Wiley, 1986.

- CORKER, K.M. 1999. Human Performance Simulation in The Analysis of Advanced Air Traffic Management. In: PROCEEDINGS OF THE 1999 WINTER SIMULATION CONFERENCE. 1999, Phoenix, Arizona. New York, NY: Ed. P.A. Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sturrock, and G.W. Evans, 1999. p. 821 - 828.
- DAHAN D., LAUGHERY K.R. The Integrated Performance Modeling Environment – Simulating Human-System Performance. In: PROCEEDINGS OF THE 1997 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997, Atlanta, Georgia. New York, NY: Ed. S. Andratóttir, K.J. Healy, D.H. Withers, and B.L. Nelson. Micro Analysis & Designs Inc Boulder, 1997. p 1141 - 1145.
- EHRHARDT, I.; HERPER H.; GEBHARDT H. Modelling Strain of Manual Work in Manufacturing Systems. In: PROCEEDINGS OF THE 1994 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1994, Orlando, Florida. San Diego, CA: Ed. J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski and A.F. Seila, 1044-1049.
- FREUDENBERG R.; HERPER H., Simulation of Workers in Manufacturing Systems. In: PROCEEDINGS OF THE 1998 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Washington, D.C.. Los Alamitos, CA: Ed D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan, p. 951-956.
- GUIMARÃES, L.B. de M; SAURIN, T.A.; FAE, C.F.; DOS SANTOS, J. A. S. Melhoria das condições de trabalho na montagem de painéis de ônibus a partir da implementação de um sistema de sub-montagem. In: XXIII ENCONTRO NAC. DE ENG. DE PRODUÇÃO, 2003, Ouro Preto, MG, Brasil Minas gerais: 21 a 24 de out de 2003.
- GUIMARÃES L.B. de M. *Organização do trabalho*. In: Guimarães, Ergonomia de Processo. 2.ed. Porto Alegre: FEENGE, 2004.
- HERPER H., KAGERL T., ZIEMS D. Incorporating Financial and Ergonomic Considerations into Models of Manufacturing Systems. In: PROCEEDINGS OF THE 1996 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1996, Coronado, California. New York, NY: Ed J.M Charnes, D.J. Morrice, D.T. Brunner, and J.J Swain, 1149-1154.
- KELLER, J. Human Performance Modeling for Discrete-Event Simulation: Workload. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE PROCEEDINGS, 2002, San Diego, California. San Diego, California: YÜCESAN, E. (ed), CHEN, C. H. (ed), SNOWDON J. L. (ed) and CHARNES J. M. (ed), 2002. p. 157 – 162.
- KELTON, David W.; SADOWSKI, Randal P.; SADOWSKI, Deborah A. *Simulation With Arena*. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- KROEMER, Karl H.E.; GRANDDJEAN Etienne. *Fitting The Task To The Human*, 5.ed. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1997.
- LAW, A. M.; KELTON W. D. *Simulation Modeling and Analysis*, 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- LAW A. M.; McCOMAS M. G. Simulation of Manufacturing Systems. In: PROCEEDINGS OF THE 1998 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Washington, D.C.. Los

Alamitos, CA: D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan, eds., 1998. p 49 – 52.

LAW A. M.; McCOMAS M. G. How to Build Valid and Credible Simulation Models. In: THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2001, Arlington, Virginia. Washington, DC: B.A. Peters, J.S. Smith, D.J. Medeiros, and M.W. Rohrer, eds., 2001. p 22 - 29.

LAUGHERY R. Computer Simulation as a Tool For Studying Human-Centered Systems. In: PROCEEDINGS OF THE 1998 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, , Washington, D.C.. Los Alamitos, CA: Ed: D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan. Micro Analysis & Design, 1998. p. 61 – 65.

MEISTER, David. *Simulation and modelling*. In: WILSON, John R (ed), CORLLET, E Niguel (ed). *Evaluation of Human Work: a practical ergonomics methodology 2.ed*. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1995.

MARQUIE, J.C.; FORET J. Sleep, Age and Shiftwork Experience, *Journal of Sleep Research* 8, p. 297-304, 1999.

MONK, Timothy H.; LENG, Victoria C., 1982. Time of Day Effects in Simple Repetitive Tasks: Some Possible Mechanisms. In; *Acta Psychologica* 51, p. 207-221. North-Holland: Publishing Company, 1982.

NANCE R. E. Simulation Programming Languages: An Abridged History. In: PROCEEDINGS OF THE 1995 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1995, Arlington, Virginia. New York, NY: Ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W.R.Lilegdon, and D. Goldsman, Arlington, VA, 1995 Dec 13-16, p. 1307-1313.

NAYLOR, T. H.; JOSEPH L.; BALINTFY, Donald S.; BURDICK, Kong Chu. *Técnicas de Simulação em Computadores*. São Paulo: Editora Vozes em colaboração com a Editora da Universidade de São Paulo, 1971.

ÖRTENGREN R. *Computer graphic simulation for ergonomic evaluation in work design*. In: Helander M. and Nagamachi, M. *Design for Manufacdturability: A Systems Approach to Concurrent Engineering and Ergonomics* Ed. [London, Washington, DC; Taylor & Francis], 1992.

PARKER, H.W.; OGLESBY, C.H. *Methods Improovement for Construction Managers*. New York: McGraw-Hill, 1972.

PATIENT Simulation Program. Disponível em:  
<[www.cscce.edu/DOCS/NURS/psphistory.htm](http://www.cscce.edu/DOCS/NURS/psphistory.htm)>. Acesso em: 05 set. 2003.

PHETTEPLACE G. Integrating Cold Weather Impacts on Human Performance Into Army M&S Applications. In: PROCEEDINGS OF THE 2000 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, Orlando, Florida. San Diego, CA: Ed: J.A. Joines, R.R. Barton, K. Kang, and P.A. Fishwick. US Army Engineer Reserch and Development Center. 2000. p. 1020 - 1024.



PROMODEL Disponível em: <<http://www.promodel.com/aboutus/>>. Acesso em: 09 out. 2004.

SCHIBER T.J.; BRUNNER D.T. The Winter Simulation Conference: Inside Discrete-Event Simulation Software: How It Works and Why is Matters. In: PROCEEDINGS OF THE 1999 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1999 Phoenix, Arizona. New York, NY: Ed. P.A. Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sturrock and G.W Evans, eds., 1999. p 72 - 80.

SEILA A. F. Introduction to Simulation. In: PROCEEDINGS OF THE 1995 SIMULATION CONFERENCE, 1995, Coronado, California. New York, NY.: Ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W.R.Lilegdon, and D. Goldsman, 1995. Dec 13-16, p. 7-15.

SPENCER, M. B. The Influence of Irregularity of Rest and Activity on Performance: a Model Based on Time Since Sleep and Time of Day. In: *Ergonomics* 30, p. 1275-1286. set. 1987.

WETTELAND C.R.; Miller J.L.; French J.; O'Brien K.; SPOONER D.J. The Human Simulation: Resolving Manning Issues Onboard DD21. In: PROCEEDINGS OF THE 2000 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, Orlando, Florida. San Diego, CA: Eds J.A. Joines, R.R. Barton, K. Kang, and P.A. Fishwick. Micro Analysis & Design, Northrop Grumman Corporation, Lockheed Martin GES, 2000. p 1402 – 1406.

WICKENS, Christopher D.; LIU, Yili; GORDON, Sallie. *An Introduction to Human Factors Engineering*, Menlo Park, California: Addison Wesley, 1997.

WILLIAMS E. J. How Simulation Gains Acceptance As A Manufacturing Productivity Improvement Tool. In: 11<sup>th</sup> EUROPEAN SIMULATION MULTICONFERENCE, 1997, Istanbul, Turkey, Michigan USA: 206-2 Engineering Computer Center, Mail Drop 3, Ford Motor Company, Dearborn, 1997.

WILSON, J.R., ARATEN, M., HIXSON, H.G., HOGGATT, A.C., KIVIAT, P.J., MORRIS, M.F., OCKENE, A., REITMAN, J., SUSSMAN, J.M. The Winter Simulation Conference: Perspectives of the Founding Fathers. In: PROCEEDINGS OF THE 1992 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1992 Arlington, VA. New York, NY: J.J. Swain, D. Goldsman, R.C. Crain, and J. R. Wilson, eds., 1992. Dec. 13-16, p. 37-62.

# APÊNDICE

Relatório final do modelo de simulação Mfg\_cost.mod, fornecido pelo Software de Simulação ProModel.

-----  
General Report

Output from C:\Simulação\ProModel\Mfg\_cost.mod [Manufacturing Costing Optimization]

Date: Oct/23/2004 Time: 04:27:32 PM  
-----

Scenario : Model Parameters

Replication : 1 of 1

Warmup Time : 5 hr

Simulation Time : 15 hr  
-----

LOCATIONS

Location Name	Scheduled		Average		Maximum Contents	Current Contents	% Util	
	Hours	Capacity	Total Entries	Minutes Per Entry				
Receive	10	2	22	54.545455	2	2	2	100.00
NC Lathe 1	10	1	60	9.471100	0.94711	1	1	94.71
NC Lathe 2	10	1	59	9.688000	0.952653	1	1	95.27
Degrease	10	2	119	9.752437	1.93423	2	2	96.71
Inspect	10	1	118	4.339788	0.853492	1	0	85.35
Bearing Que	10	100	91	39.167736	5.94044	15	13	5.94
Loc1	10	5	122	24.590164	5	5	5	72.02

LOCATION STATES BY PERCENTAGE (Multiple Capacity)

% |

Location Name	Scheduled Hours	% Empty	% Partially Occupied	% Full	% Down
Receive	10	0.00	0.00	100.00	0.00
Degrease	10	0.00	6.58	93.42	0.00
Bearing Que	10	6.63	93.37	0.00	0.00
Loc1	10	0.00	0.00	100.00	0.00

LOCATION STATES BY PERCENTAGE (Single Capacity/Tanks)

Location Name	Scheduled Hours	% Operation	% Setup	% Idle	% Waiting	% Blocked	% Down
NC Lathe 1	10	29.44	0.00	2.73	1.11	64.16	2.56
NC Lathe 2	10	29.10	0.00	2.93	0.97	65.20	1.80
Inspect	10	81.89	0.00	14.65	3.46	0.00	0.00

RESOURCES

Resource Name	Units	Scheduled Hours	Average Number Used	Average Minutes Of Times Usage	Average Minutes Per To Use	Average Minutes To Park	% Travel In	% Blocked	% Util
CellOp.1	1	10	120	2.698442	0.101667	0.000000	0.00	56.00	
CellOp.2	1	10	123	2.480203	0.095492	0.000000	0.00	52.79	
CellOp.3	1	10	128	2.491836	0.100315	0.000000	0.00	55.28	
CellOp	3	30	371	2.554806	0.099160	0.000000	0.00	54.69	

RESOURCE STATES BY PERCENTAGE

Resource Name	Scheduled Hours	% In Use	% Travel To Use	% Travel To Park	% Idle	% Down
CellOp.1	10	53.97	2.03	0.00	44.00	0.00
CellOp.2	10	50.84	1.94	0.00	47.21	0.00
CellOp.3	10	53.16	2.12	0.00	44.72	0.00
CellOp	30	52.66	2.03	0.00	45.31	0.00

NODE ENTRIES FOR CellNet

Node Name	Total Entries	Blocked Entries
N1	117	0
N2	128	0

N3	188	0
N4	120	0
N5	117	0
N6	249	0
N7	234	0

## FAILED ARRIVALS

Entity	Location	Total
Name	Name	Failed
Pallet	Receive	0
Bearing	Bearing Que	0

## ENTITY ACTIVITY

Entity	Total	Average					In	Blocked
		Quantity	Minutes	In	Move	Wait For		
Name	Exits	In System	System	Logic	Res, etc.	Operation		
Pallet	20	2	61.813050	0.000000	31.136800	1.000000	29.676250	
Blank	0	7	-	-	-	-	-	
Cog	78	2	51.045038	0.818449	2.979872	33.417885	13.828833	
Reject	40	0	49.226700	0.835000	2.000775	32.281300	14.109625	
Bearing	78	13	47.284154	0.050000	40.005679	0.000000	7.228474	

## ENTITY STATES BY PERCENTAGE

Entity	% In Move		% Wait For		% In Operation		% Blocked	
	Logic	Res, etc.	In	Operation	In	Operation	In	Operation
Name	Logic	Res, etc.	In	Operation	In	Operation	In	Operation
Pallet	0.00	50.37	1.62	48.01				
Blank	-	-	-	-				
Cog	1.60	5.84	65.47	27.09				
Reject	1.70	4.06	65.58	28.66				
Bearing	0.11	84.61	0.00	15.29				

## VARIABLES ( \* indicates observation based variables)

Variable	Average					
	Total	Minutes	Minimum	Maximum	Current	Average
Name	Changes	Per Change	Value	Value	Value	Value
COST PER PART*	78	7.631179	11.7045	11.9431	11.7045	11.8512
avg cycltime*	78	7.631179	25.7016	26.4051	25.7016	26.1428

cycle time	78	7.631179	21.178	33.19	24.357	25.2521
total time accum	78	7.631179	1082.77	3058.48	3058.48	2080.68
WIP	138	4.337833	16	22	20	19.1006
TOTAL COST	78	7.631179	490.079	1392.83	1392.83	943.563

## LOCATIONS COSTING

	\$	%	\$	%	\$	%
Location	Operation	Operation	Resource	Resource	Total	Total
Name	Cost	Cost	Cost	Cost	Cost	Cost
Receive	0.000000	0.00	0.000000	0.00	0.000000	0.00
NC Lathe 1	87.018333	12.36	93.315333	21.10	180.333667	15.73
NC Lathe 2	87.629000	12.44	93.023667	21.03	180.652667	15.76
Degrease	286.666667	40.71	0.000000	0.00	286.666667	25.00
Inspect	242.925000	34.49	255.945000	57.87	498.870000	43.51
Bearing Que	0.000000	0.00	0.000000	0.00	0.000000	0.00
Loc1	0.000000	0.00	0.000000	0.00	0.000000	0.00
SUM	704.239000	100.00	442.284000	100.00	1146.523000	100.00

## RESOURCES COSTING

	\$	%	\$	%	\$	%	
Resource	NonUse	NonUse	Usage	Usage	Total	Total	
Name	Units	Cost	Cost	Cost	Cost	Cost	
CellOp.1	1	87.995667	32.37	161.663333	33.30	249.659000	32.97
CellOp.2	1	94.428333	34.73	163.629333	33.71	258.057667	34.08
CellOp.3	1	89.435000	32.90	160.168000	32.99	249.603000	32.96
CellOp	3	271.859000	100.00	485.460667	100.00	757.319667	100.00
SUM	-	271.859000	100.00	485.460667	100.00	757.319667	100.00

## ENTITY ACTIVITY COSTING

	\$	%
Entity	Explicit	Total
Name	Exits	Cost
Pallet	20	0.000000
Blank	0	-
Cog	78	902.751000
Reject	40	396.623333
Bearing	0	0.000000
SUM	-	1299.374333